The Gran Turismo Magazine

a

Beyond the Apex

WWW.SILVERS

GT ACADEMY

2008-2013

GT ACADEMY
2008-2013

Gran Turismo: Es erweckt, inspiriert
und fördert potenzielle Motorsporttalente.

An einem der heiligsten Orte des Motorsports

GT ACADEMY
2008-2013

werden die Entschlossenheit und das fahrerische Können einiger Auserwählter bis an die Grenzen getestet.

Wählen Sie Ihre eigene Leistungseinstellung und Ihr eigenes Antriebssystem.
Nehmen Sie an 1000 Zeitrennen teil.
Lassen Sie die Erfahrungen der realen Welt
mit dem ultimativen Fahrsimulator verschmelzen.

Gehen Sie dann einen Schritt weiter.
Die GT Academy wurde im Jahr 2008 gestartet.
Ihre Mission: Jenen, die ihre Fähigkeiten in Gran Turismo verfeinert haben, dabei zu helfen,
den Traum vom Leben als echter Rennfahrer zu realisieren.

In den folgenden Jahren wurde das Projekt immer größer.
Im Jahr 2012 nahmen insgesamt 1,4 Millionen Spieler aus Europa, Amerika, Russland, Südafrika und dem Nahen Osten an Online-Qualifikationsrunden teil.

Wie Sie sehen, sollte niemand den eigenen Traum, ein Rennfahrer zu werden, aufgeben.
Eines Tages könnten Sie derjenige sein, der auf dem Podium steht und den Applaus Tausender Fans genießt.

Die wahre Natur des eigenen Charakters
wird in ihrer Gesamtheit offenbart.

GT ACADEMY
2008-2013

GT ACADEMY
2008-2013

Dieser Platz markiert die Startlinie, an der der harte Weg zur Erfüllung eines Traums beginnt.

Beyond the Apex

Inhalt

002 GT Academy 2008 - 2013

017 Kapitel 1: Fahrzeugtechnik
- 018 Vorwort
- 020 Teil 1: Kraft, Energie und Schwingung
- 036 Teil 2: Fahrzeugleistung
- 050 Teil 3: Der effiziente Motor
- 066 Teil 4: Aerodynamik
- 078 Teil 5: Numerische Strömungssimulation
- 088 Schlagwortverzeichnis

089 Kapitel 2: Übersicht: Mechanismus
- 090 Bauform: Grundlegende Eigenschaften
- 094 Motor: Das Herz des Automobils
- 104 Antrieb: Die Umwandlung von Kraft in Geschwindigkeit
- 108 Karosserie: Der Rahmen, der alles hält
- 110 Bremsen: Wärmetauscher, die die Geschwindigkeit reduzieren
- 114 Aufhängung: Stoßdämpfer zur Kontrolle der Karosseriebewegungen
- 120 Reifen: Das Bindeglied zwischen Fahrzeug und Straße
- 122 Räder: Aluminiumräder für die Straße
- 124 Aerodynamik: Die Wirkung der Luft auf die Karosserie
- 126 Schlagwortverzeichnis

127 Kapitel 3: Übersicht: Tuning & Einstellungen
- 128 Motor: Die Motorleistung verbessern
- 140 Antrieb: Den Antrieb tunen
- 146 Karosserie: Die Karosserie in Form bringen
- 148 Bremsen: Verbesserung der Bremskraft
- 150 Aufhängung: Die Aufhängung verbessern
- 152 Reifen: Aufrüsten auf Hochleistungsreifen
- 154 Spoiler: Verbesserung der Aerodynamik
- 156 Eigenschaften: Einstellungen entsprechend der Fahrzeugeigenschaften ändern
- 158 Einstellungen: Die Grundeinstellungen für alle Teile
- 166 Situationen: Einstellungen für bestimmte Situationen
- 172
- 194 Schlagwortverzeichnis

173 Kapitel 4: Streckenreferenzen

195 Kapitel 5: Sammlerautos × 30

The Gran Turismo Magazine
Beyond the Apex

ba

Fahrzeug-technik

Automobile

Vor

Es gibt viele Veröffentlichungen über Fahrzeugtechnologie, die sich von professionellen Lehrbüchern bis zu Automagazinen für jedermann erstrecken. Jedoch gibt es einen großen Unterschied zwischen professionellen Fahrzeugingenieuren und der allgemeinen Öffentlichkeit, wenn es um das Verständnis von Fahrzeugen geht und darum, wie sie funktionieren.

In diesem Buch versuchen wir, diesen Wissensunterschied zu überbrücken, indem wir auf das Basiswissen eingehen, auf dem die Arbeit von Fahrzeugingenieuren aufbaut. Außerdem werden wir einige Geschichten erzählen, die auch Leuten Spaß bereiten werden, die über professionelles Technikwissen verfügen. Hoffentlich können Sie sich die Zeit nehmen, diese Abschnitte zu lesen, um ein besseres Verständnis für den Automobilbau zu erreichen und dadurch die Welt der Hochleistungsfahrzeuge besser schätzen zu können.

Kapitel 1 beschreibt die grundlegenden Mechaniken und führt die Konzepte der Kraft, des Momentes (nachfolgend „Drehmoment") und der Energie ein, worauf eine Diskussion zur Theorie der Schwingung folgt. Kraft, Drehmoment und Energie sind Grundsäulen des Ingenieurwesens und die Theorie der Schwingung, die in Kapitel 2 erklärt wird, ist die Grundlage der Fahrzeugkinetik und des Tunings der Aufhängung.

Kapitel 2 behandelt die Fahrzeugkinetik und das Tuning des Aufhängungssystems. Dieses Kapitel wird Ihnen hoffentlich zeigen, wie Experten das Konzept der Aufhängungsbewegung verstehen und wie das Fahrzeug beeinflusst wird. Im Besonderen werden Sie die Grundlagen von Lenkungstests für das Fahrzeug lernen und wie die Aufhängung durch einen 7-Post-Fahrdynamikprüfstand analysiert werden kann.

Kapitel 3 bietet eine Einführung in die Grundlagen statistischer Mechanik und Thermodynamik, die beim Bau eines Automotors zum Einsatz kommen. Welcher Motortyp kann theoretische Effizienz erreichen? Warum tritt Energieverlust bei einem Motor auf, der theoretische Effizienz verhindert? Wir werden den natürlichen Ursachen für Energieverlust wegen physikalischer Phänomene nachgehen.

Kapitel 4 behandelt die Aerodynamik. Die bernoullische Energiegleichung, die das Verhältnis von Druck und Geschwindigkeit zeigt, wird oft verwendet, um den Abtrieb eines Rennwagens und den Auftrieb eines Flugzeugs zu beschreiben. Außerhalb der Welt der Fluiddynamik ist das nicht sehr bekannt, doch die bernoullische Energiegleichung ist lediglich ein Einstiegspunkt in die komplizierte Welt der Aerodynamik. Wir werden hier einen Schritt weitergehen und das Konzept der theoretischen Aerodynamik erforschen.

wort

Kapitel 5 erklärt die numerische Strömungssimulation (im Folgenden CFD für „Computational Fluid Dynamics“). Die CFD ist ein unverzichtbarer Teil der Automobilentwicklung und ein bekannter Begriff unter Automobilsportfans, da es eines der wichtigsten Werkzeuge bei der Entwicklung von Rennwagen ist. Das Praxiswissen darüber, wie etwas mithilfe der CFD gebaut wird, besitzt nur eine Handvoll Experten. Daher möchten wir Ihnen einen kurzen Überblick über die Konzepte der CFD-Theorie geben.

Die hier vorgestellten, technischen Theorien sind Grundwissen für Fahrzeugingenieure, jedoch relativ kompliziert für Nichteingeweihte. Das Aufnehmen all dieser Informationen von Anfang bis Ende kann sich als sehr schwierig erweisen. In diesem Fall können Sie einfach die Abschnitte durchblättern, die Ihnen interessant erscheinen. Wir hoffen, dass dies zumindest Einblicke in eine riesige Welt gewährt, die einer breiteren Öffentlichkeit zumeist verborgen bleibt und den wenigen vorbehalten ist, die man gemeinhin als professionelle Ingenieure bezeichnet.

Kraft, Energie und Schwingung

1-1 Die Konzepte der Energie und des Drehmoments

▶ Sehen wir uns ihre Definitionen und die Unterschiede zwischen den beiden an

Verschiedene Kräfte, einschließlich des Drehmoments, wirken immer dann, wenn sich ein Fahrzeug bewegt. Diese zu verstehen, ist der erste Schritt, um Autos zu verstehen.

Die Definition der Kraft

Die Reifen, die Aufhängung und der Motor erzeugen alle Kraft, wenn sich ein Fahrzeug bewegt. Diese Kräfte werden auf unterschiedliche Weise erzeugt und können verschiedene Arten von Kraft produzieren. Alle diese Kräfte lassen sich jedoch ganz simpel mit derselben Formel berechnen, nämlich der Bewegungsgleichung: F = m x a (Kraft = Masse x Beschleunigung). Es gibt keine wesentlichen Unterschiede.

Die Bewegungsgleichung zeigt, dass die Kraft von der Beschleunigung der Masse abgeleitet wird, was bedeutet, dass die Kraft ein Effekt ist, welcher die Geschwindigkeit und Richtung der Bewegung eines Objekts verändert. Umgekehrt bedeutet es, dass wenn sich die Geschwindigkeit oder Richtung einer Masse verändert, immer eine Form von Kraft involviert sein muss.

So verändert beispielsweise Reibungskraft, die zwischen der Straßenoberfläche und den Reifen erzeugt wird, die Geschwindigkeit und die Richtung der Bewegung eines Fahrzeugs (einer Masse) und die Dämpfkraft eines Stoßdämpfers reduziert die Schwingungsgeschwindigkeit des Autos und der Reifen.

Schaubild 1-1-1 **Obwohl die vielen Formen der Kraft, die auf ein Auto einwirken, unterschiedlich erscheinen, sind sie von einem physikalischen Standpunkt aus gesehen gleich.**

Schaubild 1-1-2 **Die Kraft ist ein Effekt, der die Geschwindigkeit und Richtung der Bewegung eines Objekts verändert.**

Das Hinzufügen von Kraft verändert die Geschwindigkeit und Richtung eines Objekts.

Die verschiedenen Kräfte, die ein Auto erzeugt, können alle mit folgender Gleichung berechnet werden:

F = m x a (Kraft = Masse x Beschleunigung)

Kraft ist ein Phänomen, das die Geschwindigkeit einer Masse beeinflusst.

Die Definition des Drehmoments

Dreht man das Lenkrad, ändert das Fahrzeug die Fahrtrichtung, da die Reifen eine Kraft senkrecht zur Bewegungsrichtung erzeugen. Die Drehbewegung eines Fahrzeugs, die von so einer Kraft erzeugt wird, heißt Gierbewegung. In ähnlicher Weise wird der Effekt, bei dem eine Kraft die Drehbewegung eines Objekts verursacht, Drehmoment genannt. Die Höhe des Drehmoments hängt von der Menge der eingesetzten Kraft multipliziert mit der Entfernung von der Rotationsachse ab. Dies kann mathematisch als M = L x F (Drehmoment = Länge von der Rotationsachse x Kraft) dargestellt werden.

Sehen wir uns das tatsächliche Drehmoment beim Richtungswechsel eines Autos an. Wenn sich die Rotationsachse im Schwerpunkt des Fahrzeugs befindet, das die Richtung ändert, wird die Höhe des Drehmoments, das die Vorderräder erzeugen, durch [Entfernung der Vorderräder zum Schwerpunkt] X [von diesen Rädern erzeugte Seitenkraft] bestimmt. Während der Richtungsänderung erzeugen die Hinterräder natürlich Drehmoment von [Entfernung der Hinterräder zum Schwerpunkt] X [von den Hinterrädern erzeugte Seitenkraft]. Dies erzeugt Widerstand in entgegengesetzter Richtung zu den Vorderrädern und beeinflusst dadurch das Drehmoment der Vorderräder.

So wird zum Beispiel beim Kurvenfahren, wenn man das Lenkrad einschlägt, das von den Vorderrädern verursachte Drehmoment größer als das der Hinterräder, was den Richtungswechsel des Fahrzeugs verursacht. Das Drehmoment, das von den Vorder- und Hinterrädern erzeugt wird, ist nahe am Schneidepunkt der Kurve gleich groß. Sobald dieser Punkt passiert wurde, wird beim Zurückdrehen des Lenkrads das von den Hinterrädern verursachte Drehmoment größer als das der Vorderräder, wodurch die Drehung beendet wird.

Schaubild 1-1-3 **Verhältnis zwischen den Drehmomenten, die über die Vorderräder und über die Hinterräder auf das Fahrzeug übertragen werden. Ein Auto ändert Richtung, wenn das Drehmoment der Vorderräder größer ist als der Hinterräder.**

L Vorderräder x F Vorderräder > L Hinterräder x F Hinterräder: Der Gierwinkel des Fahrzeugs erhöht sich (es lenkt ein).

L Vorderräder x F Vorderräder < L Hinterräder x F Hinterräder: Der Gierwinkel des Fahrzeugs senkt sich (es lenkt aus).

Das Drehmoment ist die Kraft, welche die Drehbewegung eines Objekts verursacht.

M = L x F (Drehmoment = Entfernung zur Rotationsachse x Kraft)

Schaubild 1-1-4

TIPPS Schaubild 1-1-4 zeigt die Kraft, die von den Vorder- und Hinterrädern eines Nissan GT-R NISMO GT3 (links) und eines Nissan Delta Wing (rechts) erzeugt wird. Nehmen wir an, die Rotationsachse des Fahrzeugs sei der Schwerpunkt. Als Nächstes beachten Sie bitte, dass die Entfernung jeder Rotationsachse (des Schwerpunktes) zu den Vorder- und Hinterrädern unterschiedlich ist. Wir erkennen, dass die Kraft, die von den Vorder- und Hinterrädern erzeugt werden muss, bei beiden Fahrzeugen unterschiedlich ist, um das Drehmoment auszubalancieren, das von den Vorder- und Hinterrädern erzeugt wird. Der Schwerpunkt des Delta Wing liegt weit hinten; die für Vorder- und Hinterreifen erforderliche Bodenhaftungskraft ist also vollkommen unterschiedlich. In der Realität wird für die Vorderräder des Delta Wing ein spezieller Reifen verwendet, der nur 10 cm breit ist. Im Vergleich dazu befindet sich beim GT-R NISMO GT3 der Schwerpunkt nahe der Karosseriemitte. Sowohl für Vorder- als auch für Hinterreifen ist also ungefähr die gleiche Kraft erforderlich.

1 2 Das Konzept der Energie

▶ Was bedeutet Energieerhaltung?

Der Energieerhaltungssatz

Zu den physikalischen Reaktionen in einem Auto gehören kinetische, thermische, elektrische, magnetische und chemische. Beispiel: Wenn sich Benzin im Zylinder eines Motors entzündet, erhöht sich die Temperatur im Zylinder, sodass der Kolben sich als Resultat einer chemischen, thermischen und kinetischen Reaktion bewegt. Abgesehen von der Kraft erzeugen all diese verschiedenen Arten von physikalischen Phänomenen eines: Energie. Energie kann von einer Form in eine andere übergehen – auch beim Wechsel zwischen verschiedenen physikalischen Phänomenen. Die Gesamtsumme der Energie vor und nach diesem Übergang ändert sich nicht und bleibt konstant. Die entsprechende Gesetzmäßigkeit nennt man den Energieerhaltungssatz.

Schaubild 1-2-1 **Das Konzept der Energie**

Physikalische Phänomene in einem Auto

- Kinetische Reaktion
- Thermische Reaktion
- Elektrische Reaktion
- Magnetische Reaktion
- Chemische Reaktion

→ Energie ist das gemeinsame physikalische Ergebnis.

Bremsen ist die Umwandlung von kinetischer Energie in thermische Energie.

Energieerhaltung des Motorzylinders

Betrachten wir die durch das physikalische Phänomen eines sich bewegenden Zylinders in einem Motor erzeugte Energie, stellen wir fest, dass die chemische Energie des Benzins in thermische und kinetische Energie umgewandelt wird. Man könnte auch sagen, dass der Benzinmotor eine Maschine ist, die chemische Energie in kinetische Energie umwandelt, eine Form, die für den Menschen praktisch nutzbar ist. In diesem Moment garantiert der Energieerhaltungssatz, dass die Menge der umgewandelten chemischen Energie gleich der Summe der Energiemengen ist, die in thermische und kinetische Energie umgewandelt wird. Wie gut ein Motor chemische Energie in nutzbare kinetische Energie umwandelt, ist entscheidend für die Effizienz eines Motors.

Schaubild 1-2-2 **Das Konzept der Energieumwandlung im Zylinder eines Motors**

Chemische Energie	
↓	
Thermische Energie	Kinetische Energie

Die Umwandlung der Energie verändert nicht die Gesamtmenge an Energie. Das nennt man den Energieerhaltungssatz.

Schaubild 1-2-3

Der Schwingungsmechanismus

▶ Schwingung steht im Zusammenhang mit der Masse und der Elastizität eines Objekts

Schwingung entsteht in allen Fahrzeugmotoren, Aufhängungssystemen, Karosserien usw. In Teill 2 erklären wir, inwiefern die Bewegung eines Fahrzeugs auch zum Phänomen der Schwingung gehört. Was ist nun der Schwingungsmechanismus? Bevor wir mit der Erklärung der Fahrzeugbewegung beginnen, wollen wir zunächst das Konzept der Schwingung näher definieren.

Schwingung unter dem Aspekt der Kraft betrachtet

Am einfachsten ist es, sich eine Feder vorzustellen, an der ein Gewicht hängt. Dies ist ein einfaches Schwingungssystem, bei dem ein Objekt in Schwingung versetzt wird (Schaubild 1-3-1). Wenn man das Gewicht mit der Hand zieht, wird die Feder gedehnt und Elastizität gegen diese Kraft erzeugt (Nr. 1-2). Wenn das Gewicht losgelassen wird, kehrt die Feder wieder zu ihrer ursprünglichen Länge zurück und zieht das Gewicht durch ihre Elastizität zurück (Nr. 3). Die Feder kehrt zu ihrer ursprünglichen Länge zurück; aufgrund der Trägheit wird sich das Gewicht selbst dann noch weiter bewegen, wenn die Elastizitätskraft null erreicht hat (Nr. 4). Wenn die Feder die maximale Kompression erreicht, verlangsamt sich die Bewegung des Gewichtes, bis es kurz verharrt (Nr. 5), doch die Gewichtskraft sorgt bald dafür, dass sich die Feder wieder bewegt (Nr. 6). Die zusammengedrückte Feder dehnt sich und setzt ihre Elastizität ein, um wieder in ihre Ausgangsposition zurückzukehren (Nr. 7). Wenn sie dies schließlich tut, sorgt die Trägheit des Gewichtes dafür, dass sich die Feder erneut bewegt (Nr. 8). Die Zyklen von Nr. 1 bis Nr. 8 wiederholen sich und nehmen beständig ab, während die Feder in ihre ursprüngliche Position zurückkehrt. Das ist Schwingung unter dem Aspekt der Energie betrachtet. Während des Phänomens der Schwingung sind Trägheit und Elastizität eines Objekts sowohl Ursache als auch Wirkung.

Schaubild 1-3-1 **Wenn wir Schwingung unter dem Aspekt der Energie betrachten, entspricht die Trägheitskraft des Gewichts immer der Elastizität der Feder. Beachten Sie, dass die Länge der Pfeile in vertikaler Richtung der Feder bei jedem Prozess gleich ist.**

Schwingung unter dem Aspekt der Energie betrachtet

Die Schwingung, die wir soeben beschrieben haben, kann unter Anwendung des Energieerhaltungssatzes betrachtet werden. Wenn wir Schwingung unter dem Aspekt der Energie betrachten, kann man sagen, dass sie ein Austausch der kinetischen Energie des Gewichts mit der Expansion und Kontraktion durch die elastische Energie der Feder ist. Die elastische Energie der Feder ist am größten, wenn die Auslenkung der Feder am größten ist (die Feder ist vollständig gedehnt oder vollständig zusammengezogen), wie in Schaubild 1-3-1 an den Positionen Nr. 1, Nr. 5 und Nr. 9 zu sehen.

Die maximale Geschwindigkeit und damit die größte kinetische Energie des Gewichts ist an den Positionen Nr. 3 und Nr. 7 zu sehen. Das sind die Punkte, an denen die Feder kurzzeitig wieder ihre normale Länge erreicht hat.

Schaubild 1-3-2 Unter dem Aspekt der Energie betrachtet ist Schwingung der Austausch zwischen der kinetischen Energie des Gewichts und der elastischen Energie der Feder.

Schaubild 1-3-3 Bei einer Fahrzeugkarosserie ist die offensichtlichste Schwingung die Kraft, die von der Straßenoberfläche auf die Aufhängung übertragen wird.

1-4 Das Phänomen der Resonanz

▶ Resonanz ist ein nicht widerstandsfähiger Zustand gegenüber externer Anregung

Das Phänomen, das als Resonanz bekannt ist, macht die Betrachtung von Themen wie Aufhängungssysteme und Motorschwingungen komplizierter. Resonanzen müssen so gut wie möglich vermieden werden, selbst wenn diese notwendigerweise erzeugt werden. Dazu müssen wir zunächst verstehen, was Resonanzen sind.

Schaubild 1-4-1 Lässt man das System frei schwingen, schwingt es mit seiner Eigenfrequenz und nicht mit irgendeiner anderen Frequenz.

Freie Schwingung und Eigenfrequenz

Gehen wir von einem Schwingungssystem mit einer Feder und einem Gewicht aus. Nachdem wir das System einmal gedehnt haben, lassen wir es frei schwingen. Das nennt man freie Schwingung. Nach kurzer Zeit schwingen das Gewicht und die Feder in einer gleichmäßigen Frequenz. Das Ergebnis ist identisch, egal wie stark oder schwach das System gedehnt wird. Die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde ist normal für die Elastizität der Feder und die Masse des Gewichts. Man nennt sie auch Eigenfrequenz. Diese Eigenfrequenz ist eine Frequenz, die auf der Schwingung des Systems selbst beruht. Wenn es in seiner Eigenfrequenz schwingt, sind die Elastizität der Feder und die Trägheit des Gewichts immer gleich groß, was zu wiederholtem, natürlichem Austausch von Energie führt.

Erzwungene Schwingung und Resonanz

Jetzt wollen wir Feder und Gewicht mit der Hand dehnen und zusammenziehen. Das nennt man erzwungene Schwingung. Geschieht das auf eine Weise, die eine Eigenfrequenz verhindert, müsste man einen Widerstand in der Hand spüren. Wenn ein Schwingungssystem in seiner Eigenfrequenz schwingt, wird jede andere Frequenz als für das Schwingungssystem unnatürlich angesehen. Unabhängig davon, ob eine Schwingung extern angewandt wird, wird ein Schwingungssystem immer versuchen, in seiner Eigenfrequenz zu schwingen, sodass man bei allen anderen Schwingungen einen Widerstand fühlt.

Schaubild 1-4-2

Selbst wenn wir ein System zwingen, mit einem anderen Wert als der Eigenfrequenz zu schwingen, versucht das System mit seiner Eigenfrequenz zu schwingen. Diese Bewegung führt zu Widerstand.

Schaubild 1-4-3

Wird einem System auf seiner Eigenfrequenz Schwingung hinzugefügt, erzeugt es keinen Widerstand. Stattdessen absorbiert das System die kinetische Energie aus der Hand und erhöht seine Amplitude. Das nennt man Resonanz.

Erzwungene Schwingung und Resonanz (Fortsetzung)

Was passiert, wenn man das System in seiner Eigenfrequenz dehnt und zusammenzieht? Man wird keinen Widerstand spüren, da die Schwingung ihrer Eigenfrequenz enspricht. Man sollte beachten, dass die Amplitude der Schwingung wächst, um sich der hinzugefügten Schwingung anzupassen. Dies rührt daher, dass das System die Energie der externen Anregung absorbiert, statt ihr zu widerstehen. Die Schwingung des Systems wächst so lange weiter, wie der natürlichen Schwingung externe Anregung hinzugefügt wird.

Wie oben erklärt, nennt man das Phänomen, bei dem sich die Schwingung durch das Hinzufügen externer Schwingung zur natürlichen Schwingung des Systems erhöht, „Resonanz" und die Frequenz an diesem Punkt „Resonanzfrequenz".

Die Resonanz der Aufhängung beispielsweise führt zu einer Verschlechterung des Fahrkomforts und des Erdungswiderstands. Zusätzlich würde der Motor, wenn er Widerstand erzeugt, beschädigt werden. Daher ist es notwendig, Resonanz weitestgehend zu vermeiden. Eine Möglichkeit, Schäden durch Resonanz vorzubeugen, ist die Verwendung eines Dämpfungssystems. Der Dämpfer absorbiert die Energie der Schwingung und wandelt sie in Wärmeenergie um, die dann extern abströmt. Somit kann ein effektives Dämpfungssystem Schäden an Mechanismen vorbeugen.

Schaubild 1-4-4 **Der Motor kann als ein Schwingungssystem betrachtet werden, in dem Schwingungen durch konstante Verbrennung erzeugt werden. Wenn ein Motor mitschwingt, kann dies zu schwerwiegenden Schäden am Motorblock oder Zylinderkopf führen.**

TIPPS In den bisherigen Beschreibungen scheinen Eigenfrequenz und Resonanzfrequenz nahezu identisch zu sein. Das ist aber nicht der Fall. Die Eigenfrequenz wird von der Masse und der Elastizität der Feder bestimmt, die Resonanzfrequenz jedoch durch das Hinzufügen des Elements der Dämpfkraft zur Eigenfrequenz. Gibt es keine Dämpfkraft im System, können die Eigenfrequenz und die Resonanzfrequenz übereinstimmen. Wenn aber ein Stoßdämpfersystem existiert, wird die Resonanzfrequenz verringert und resultiert in einem Ungleichgewicht zur Eigenfrequenz des Systems. Eine Resonanzfrequenz (Eigenfrequenz), die keinem Stoßdämpfersystem ausgesetzt ist, wird manchmal als „ungedämpfte Eigenfrequenz" bezeichnet und eine Resonanzfrequenz mit Dämpfung nennt man auch „gedämpfte Eigenfrequenz".

1-5 Wirkung der Dämpfkraft

▶ Zustand der Schwingung variiert mit Dämpfkraft

Bisher haben wir Fälle von Schwingung in einem Schwingungssystems betrachtet, das aus Federn und Gewichten besteht – und auch gesehen, dass Resonanz ein Problem darstellt, wenn das Schwingungssystem durch Kraft in seiner Eigenfrequenz (Resonanzfrequenz) schwingt. Es gibt einige Methoden, um durch Resonanz verursachte Probleme zu vermeiden, aber die geläufigste ist die Installation eines Stoßdämpfers im Schwingungssystem. Ein Stoßdämpfer ist ein Gerät, das Schwingung ableitet, indem es kinetische Energie in Wärmeenergie umwandelt. Der Zustand der Schwingung wird jedoch maßgeblich durch die Dämpfkraft des Stoßdämpfers verändert. Schauen wir uns einmal die Wirkung von Unterschieden in der Dämpfkraft beim Phänomen der Schwingung an.

Freie Schwingung mit unterschiedlichem Dämpfungsgrad

Die bisher beschriebene Schwingung ist ein Ergebnis der Elastizität der Feder und der Kraft der Masse. Wenn wir aber einen Dämpfer in das Schwingungssystem einfügen, wird die Schwingung gedämpft und die Bewegung hört kurze Zeit später auf. Während des Vorgangs hat die Stärke der Dämpfkraft Einfluss auf die Dämpfung der Schwingung. Hier ist der Dämpfungsgrad ein Indikator für die Stärke der Dämpfkraft des Dämpfers gegenüber der Wirkung der Masse und der Elastizität der Feder.

Wenn der Dämpfungsgrad größer als 1 ist, nähert sich die Bewegung des Schwingungssystems einem nicht schwingenden Zustand an, weil die Dämpfkraft stärker als die Feder und die Masse ist. Diesen Zustand nennt man überkritische Dämpfung (Überdämpfung). Im Zustand der überkritischen Dämpfung sinkt die Amplitude mit der Zeit und geht in eine unregelmäßige Bewegung über, die asymptotisch zu 0 ist. Wenn der

Schaubild 1-5-1 Beispiel einer Schwingung des Dämpfungssystems

Auslenkung
Dämpfungsgrad > 1 Überkritische Dämpfung
Zeit
Auslenkung
Dämpfungsgrad = 1 Kritische Dämpfung
Zeit
Auslenkung
Dämpfungsgrad < 1 Geringe Dämpfung
Zeit

Dämpfungsgrad kleiner als 1 ist, weil er in einem Zustand ist, in dem die Kraft der Feder und Masse im Vergleich zur Dämpfkraft stark ist, sinkt die Amplitude der Schwingung mit der Zeit und verlängert weiterhin die Dauer der Schwingung. Diesen Zustand nennt man geringe Dämpfung (mangelnde Dämpfung). Übrigens, wenn der Dämpfungsgrad 0 beträgt, tritt keine Dämpfkraft auf – man erhält also einen Zustand ähnlich dem, wenn der Dämpfer nicht funktioniert – und die Schwingung wird somit nicht gedämpft. Wenn der Dämpfungsgrad 1 beträgt, erhält man zudem einen kritischen Zustand direkt an der Schwelle zu dem Punkt, an dem die Schwingung auftritt. Diesen Zustand nennt man kritische Dämpfung.

Schaubild 1-5-2 **Dämpfer einer Fahrzeugaufhängung. Der Dämpfungsgrad ist ein wichtiger Indikator, wenn man die Aufhängung tunt – gemäß Faustregel beträgt dieser für gewöhnlich 0,1 bis 0,3 bei Personenkraftwagen, 0,5 bei Sportwagen und etwa 0,7 bei Rennwagen (Hinweis: Es gibt Abweichungen zu diesen Zahlen).**

TIPPS Um zu verhindern, dass Schwingung die Basis beeinflusst, die schwingende Maschinenteile und andere Bauteile unterstützt, oder umgekehrt, werden Teile wie Gummi, Reifen, Federn und Stoßdämpfer oft unterstützend eingesetzt. Nicht selten wird ein Modell eines Schwingungssystems erstellt, das die genannten unterstützenden Teile verwendet (wie in Schaubild 1-5-3 gezeigt), um zu sehen, wie Schwingung den Mechanismus und die Basis beeinflusst. So kann beispielsweise die Aufhängung zusammen mit Federn, Dämpfern und Masse als eine Einheit modelliert und dargestellt werden, um die Charakteristik der Schwingung auszuwerten. Das wird in Teil 2 eingehender behandelt.

Schaubild 1-5-3 **Modell einer Grundschwingung**

1-6 Phasendifferenz

▶ Die Phasendifferenz ist eine Differenz im Rhythmus der Schwingung

Wenn ein Fahrzeug mit der Wellenform der Straßenoberfläche interagiert, „reduziert“ die Aufhängung die Amplitude der Wellenform, die an die Karosserie des Fahrzeugs übertragen wird. Im Ergebnis ist die Amplitude, die die Karosserie erfährt, sanfter als die Wellenbewegung der Straße. Versteht man die Wellenform der Straße als „Einwirkung“, ist es wichtig, zu wissen, wie viel der Amplitude des Fahrzeugs (oder der „Reaktion“) zur Einwirkung gedämpft wird. Das ist allerdings noch nicht alles – auch die „Reaktionsgeschwindigkeit auf eine Einwirkung“ ist sehr wichtig.

Schaubild 1-6-1 **Wellenform einer Straßenoberfläche und die durch die Aufhängung verursachte Amplitude der Karosserie. Konzentrieren wir uns auf ihr Verhältnis zueinander. Es ist von höchster Wichtigkeit, die Amplitude der Karosserie zu verringern, aber zu wissen, wie schnell die Karosserie auf die Wellenform der Straßenoberfläche reagiert, ist ebenso entscheidend.**

Schaubild 1-6-2 **7-Post-Unterboden-Dynamikprüfstand des deutschen Fahrwerkherstellers KW**

Schaubild 1-6-3

Wenn die Frequenz der Schwingung an dem Punkt, an dem die Schwingung auftritt, besonders niedrig ist, sind die Phasen der Amplituden von Einwirkung und Reaktion gleich.

Phase verschiebt sich um 90°, wenn Schwingung mit Eigenfrequenz übereinstimmt.

Phasendifferenz verschiebt sich um 180°, wenn die Schwingungsfrequenz der Anregungskraft signifikant erhöht wird.

Differenz des Schwingungsrhythmus

Die „Phasendifferenz" wird verwendet, um zu bewerten, wie schnell bestimmte Schwingungssysteme auf Einwirkungen reagieren. Wir erläutern dies erneut anhand eines Schwingungssystems mit Gewichten und Federn.

Wenn Ihre Hand eine Anregung der Frequenz verursacht, die sich von der Eigenfrequenz der Feder und derjenigen der Gewichte unterscheidet (Resonanzfrequenz), warum spürt man dann einen Widerstand an der Hand? Wie zuvor erklärt, leistet das Schwingungssystem Widerstand, da jede Schwingungsfrequenz neben der Eigenfrequenz als unnatürlich angesehen wird. Anders ausgedrückt: „Der Schwingungsrhythmus der Hand ist anders als der Eigenschwingungsrhythmus des Schwingungssystems." Genauer gesagt, bedeutet das, dass der Rhythmusunterschied durch „den Unterschied zwischen der Richtung, in der die Schwingung hinzugefügt wird, und der Richtung der Trägheit des Gewichts" entsteht. Dieser Rhythmusunterschied wird „Phasendifferenz" genannt.

Werfen wir einen Blick auf das Schaubild 1-6-3. Wenn wir der Schwingungsfrequenz langsam Schwingung hinzufügen, bewegen sich Expansion und Kontraktion der Feder und die Kraft der Hand im selben Rhythmus und in dieselbe Richtung. Es gibt zu diesem Zeitpunkt keine Diskrepanz und keine Reaktion beim Einwirken, sodass die Phasendifferenz null beträgt (Schaubild 1-6-3 oben). Wird allerdings die Einwirkungsfrequenz signifikant erhöht, beträgt die Phasendifferenz am Ende 180 Grad, da die Trägheitskraft des Gewichts und die Anregungskraft der Einwirkung der Hand in entgegengesetzten Richtungen wirken (Schaubild 1-6-3 unten). Bitte beachten Sie, dass die Phasendifferenz 90 Grad beträgt, wenn das System mit seiner Eigenfrequenz in Schwingung versetzt wird (Schaubild 1-6-3 Mitte).

1-7 Frequenzverhalten

▶ Eine Analyse von Fahrzeugbewegung und Aufhängung

Den Reaktionsunterschied gegenüber der Frequenzanregung verstehen

Ein solches Verhalten der Amplitude und der Phasendifferenz gegenüber der Anregungsfrequenz (Schwingungsfrequenz der Anregungskraft) wird auch als Frequenzverhalten bezeichnet. Bislang haben wir nur die Phasendifferenz und die Veränderungen der Amplitude aufgrund der Schwingungsfrequenz der Anregung (Schwingung) besprochen. Jetzt wollen wir den Blick darauf richten, wie Phase und Amplitude auf Änderungen des Schwingungssystems aufgrund der Anregungsfrequenz reagieren.

In der Schwingungsanalyse eines Autos wird das Frequenzverhalten häufig durch ein Bode-Diagramm analysiert. Schaubild 1-7-1 zeigt ein Bode-Diagramm und der obere Graph wird Größendiagramm genannt. Er zeigt die Größe (Verstärkung) der Reaktion im Verhältnis zur Anregungsfrequenz (Einwirkung). Der Graph, der sich im Schaubild 1-7-1 unten befindet, wird Phasendiagramm genannt und zeigt, wie stark sich die Reaktion (Phasendifferenz) von der Einwirkung absetzt.

Bislang haben wir über ein Schwingungssystem nachgedacht, das aus einem Gewicht und einer Feder besteht. Um die Dinge noch ein wenig zu verkomplizieren, stellen wir uns einmal ein Schwingungssystem vor, dem ein Stoßdämpfer hinzugefügt wurde (Schaubild 1-7-2). Wir setzen den Dämpfungsgrad zunächst auf eine Zahl unter 1 – in anderen Worten: Wir wenden eine geringe Dämpfung an.

Schaubild 1-7-1 **Das Bode-Diagramm zeigt das Frequenzverhalten eines Schwingungssystems aus Feder, Stoßdämpfer und Gewicht.**

Die Schwingung des Stoßdämpfersystems mit dem Bode-Diagramm erfassen

Mit diesem Modell im Hinterkopf erhöhen wir langsam die ursprüngliche Frequenz der Schwingung. Wenn die Frequenz besonders niedrig ist, ist das Amplitudenverhältnis 1. Oder anders ausgedrückt: Die Amplitude der Anregung und die Amplitude der Feder unterscheiden sich nicht. Wenn die Frequenz erhöht wird, vergrößert sich auch die Amplitude und die Phasendifferenz wird größer. Sobald die Schwingungsfrequenz eine bestimmte Zahl erreicht, ist die Amplitude an ihrem Maximum angekommen: Das wird als Resonanz bezeichnet. Ab jetzt wird eine Erhöhung der Frequenz die Amplitude verkleinern, bis sie fast bei 0 ist. Wenn allerdings die Schwingungsfrequenz sehr niedrig ist, bewegen sich Anregung und Feder im selben Rhythmus und in derselben Richtung, sodass der Wert 0 beträgt. Bei der Eigenschwingungsfrequenz beträgt die Phasendifferenz aber -90 Grad und bei extrem hoher Schwingungsfrequenz beträgt die Phasendifferenz -180 Grad.

Schaubild 1-7-2 **Dieses Modell besteht aus Feder, Stoßdämpfer und Gewicht. Der Stoßdämpfer liegt parallel zur Feder, um zu vermeiden, dass die Amplitude bei der Resonanz unendlich groß wird.**

1-8 Schwingung in der Aufhängung

▶ Schwingung in einem System mit mehrfachem Freiheitsgrad

Um es einfacher zu machen, haben wir versucht, die Grundlagen der Schwingung anhand eines einfachen Schwingungsmodells zu verstehen, das nacheinander alle Schwingungselemente von Feder, Gewicht und Stoßdämpfer miteinander kombiniert. Allerdings ist ein Auto ein Schwingungssystem, das mehrere Schwingungen dieser Elemente miteinander kombiniert. Werfen wir einen Blick auf die grundlegenden Eigenschaften der vielen Elemente im Schwingungskontrollsystem, bevor wir Schwingungskontrolle durchführen, etwa über das Tuning der Aufhängung.

Schwingungseigenschaften der Aufhängung

Obwohl es in der Aufhängung eines Automobils verschiedene Mechanismen gibt, handelt es sich im Grunde um ein Schwingungssystem, das aus Masse, einer Feder und einem Stoßdämpfer besteht. Es kann wie in Schaubild 1-7-2 gestaltet werden. Der Stoßdämpfer und die Feder zwischen Rad und Fahrzeugkarosserie stellen das sogenannte Aufhängungssystem des Autos dar. Und als Feder und Stoßdämpfer zwischen Straßenbelag und Rad fungieren die Reifen.

Führen wir jetzt die verschiedenen Schwingungsfrequenzen vor, die auf dieses Modell wirken (Schaubild 1-8-2). Bei einer Frequenz nahe dem Ruhezustand ist die Auslenkung der Karosserie identisch mit der Auslenkung einer Straßenschwingung, das Amplitudenverhältnis wäre also 1. Wird die Frequenz langsam erhöht, erhöht sich auch die Amplitude. Wird eine bestimmte Schwingungsfrequenz erreicht, erreicht die Amplitude eine Spitze und es entsteht Resonanz an Teilen oberhalb der Feder. Wird die Frequenz weiter erhöht, sinkt die Amplitude, wird aber bei einer bestimmten Frequenz wieder verstärkt und es entsteht erneut Resonanz in Teilen unterhalb der Feder, die wiederum die Amplitude der Karosserie erhöht. Wird die Frequenz noch weiter erhöht, sinkt die Amplitude wieder und erreicht schließlich fast 0.

Schaubild 1-8-1 **Modell eines Rads (1/4 der Schwingung des Fahrzeugs). Reifen, Feder und Stoßdämpfer haben alle eigene Eigenschaften eines Schwingungssystems.**

Fahrzeugkarosserie
Aufhängung
Rad
Reifen

Schaubild 1-8-2 Veränderung, wenn die Schwingungsfrequenz allmählich erhöht wird. Die Resonanz der Karosserie findet mit relativ niedriger Schwingungsfrequenz statt, während die Resonanz des Rads mit höheren Frequenzen stattfindet.

Auslenkung der Autokarosserie / Auslenkung des Straßenbelags

1

Schwingungsfrequenz

Hauptresonanz (Resonanz der Karosserie)

Sekundärresonanz (Resonanz des Rads)

Schwingungsmodus

Resonanz ist im obigen Beispiel zweimal aufgetreten. Resonanz kann aber viele Male auftreten, wenn das System sich in verschiedene Richtungen bewegt. Die Anzahl der Richtungen, in die sich das System bewegen kann, wird als „Freiheitsgrad" bezeichnet. In diesem Fall können Reifen und Feder sich in jeweils eine Richtung nach oben und unten bewegen, sodass also insgesamt zwei Eigenfrequenzen beteiligt sind. Da zwei Arten von Resonanzen auftreten können, hat dieses Vibrationssystem einen Freiheitsgrad von 2.

Die Anfangsresonanz heißt „Hauptresonanz" und die zweite Resonanz wird „Sekundärresonanz" genannt. Für gewöhnlich kann Resonanz in einer Maschine unendliche Male auftreten. Was aber im Maschinenbau wichtig ist, ist eine Resonanz mit niedriger Frequenz; höhere Resonanz wird oft ignoriert. Mit anderen Worten, in diesem Beispiel ist die Resonanz dessen, was über der Feder ist, wichtiger als die Resonanz dessen unter der Feder. Das liegt daran, dass die niederfrequente Amplitude selbst bei gleicher involvierter Energiemenge dazu neigt, groß zu sein, und da diese Komponenten die Phänomene des ganzen Systems dominieren, sind sie entscheidend für die meisten Charakteristiken der Vibration.

Schaubild 1-8-3 Evaluierung der Aufhängung des GT-R, der auf dem Nürburgring angetreten ist, was ein Testen der Aufhängung bei unterschiedlichen Schwingungsfrequenzen und die Analyse des Frequenzverhaltens beinhaltet.

2-1 Reifendynamik

▶ Die Kräfte verstehen, die durch den Reifen erzeugt werden

Seitenführungskraft

Die Art der Kraft, die ein Objekt auf scherende Weise deformiert, nennt sich „Scherkraft" und die Eigenschaft des Objekts, die dieser Kraft entgegenwirkt, heißt Schubmodul. Wenn ein Reifen transversalen Scherkräften ausgesetzt ist, verformt der Reifen sich seitwärts, wie in Schaubild 2-1-1 zu sehen ist. Gleichzeitig wirkt der Schubmodul des Reifens der Scherkraft entgegen. Diese Eigenschaft des Reifens, die der Deformation entgegenwirkt, erzeugt die Kräfte, die notwendig sind, damit das Auto beschleunigen, bremsen und die Richtung ändern kann.

Sehen wir uns das näher an. Schaubild 2-1-2 zeigt einen Reifen in der Kurvenfahrt. Wie man sieht, besteht ein Unterschied zwischen der Drehrichtung des Reifens und der Fahrtrichtung des Autos. Mit anderen Worten: Die Interaktion des Reifens mit der Straße erzeugt Kraft, wenn der Reifen sich dreht und sich gleichzeitig seitwärts deformiert. Der Winkel zwischen der Rotationsebene und der Fahrtrichtung nennt sich Schräglaufwinkel. Die Kraft, die im rechten Winkel zur Fahrtrichtung wirkt, nennt sich Seitenführungskraft. Aufgrund der Seitenführungskraft des Reifens ist ein Auto in der Lage, Kurven zu fahren.

Im Allgemeinen kann eine stärkere Seitenführungskraft mit demselben Schräglaufwinkel erzeugt werden, wenn der Schubmodul größer ist. Ist der Schubmodul zu groß, kann die Reibung durch einen kleinen Schräglaufwinkel gesättigt werden, was zu einer unnatürlichen Rückmeldung an den Fahrer führen kann. Ist der Schubmodul zu klein, wird die Verformung des Reifens zu extrem, was dem Fahrer ein unkomfortables oder unsicheres Gefühl vermitteln kann.

Schaubild 2-1-1 **Querschnittschaubild, das Reifenverformung und Kraft illustriert. Allgemein gilt, dass ein größerer Schubmodul eine größere Seitenführungskraft erzeugt.**

Seitenlast (Scherkraft)

Schubmodul

Schaubild 2-1-2 **Die Draufsicht zeigt das Verhältnis zwischen Verformung und Kraft. Die Seitenkraft tritt senkrecht zur Mittelebene des Reifens auf. Die Seitenführungskraft ist ein Element der Seitenkraft und tritt senkrecht zur Fahrtrichtung auf.**

Fahrtrichtung
Mittelebene des Reifens
Schräglaufwinkel
Haftbereich
Rutschbereich
Seitenführungskraft
Seitenkraft
Aufstandsfläche

Verhältnis zwischen Seitenführungskraft und Schräglaufwinkel

Schaubild 2-1-3 zeigt das Verhältnis zwischen Schräglaufwinkel und Seitenführungskraft. Ist der Schräglaufwinkel klein, kommt es bei der Seitenführungskraft zu einer linearen Zunahme. Nimmt der Schräglaufwinkel zu, wird die Seitenführungskraft gesättigt. Diese Änderungsrate der Seitenführungskraft nennt sich Kurvensteifigkeit. Ein Reifen, der eine hohe Seitenführungskraft mit einem kleinen Schräglaufwinkel erzeugt, besitzt eine hohe Kurvensteifigkeit.

Schaubild 2-1-3 Korrelation zwischen Schräglaufwinkel und Seitenführungskraft. Die Kurvensteifigkeit ist hoch innerhalb des Bereichs, in dem der Schräglaufwinkel relativ klein ist. Nachdem der Schräglaufwinkel einen bestimmten Wert erreicht hat, nimmt die Kurvensteifigkeit nicht mehr zu.

Luftdruck und Kurvensteifigkeit

Wenn der Luftdruck im Bereich relativ niedrig ist, erhöht der Schubmodul sich im Allgemeinen bei Erhöhung des Luftdrucks, sodass die Kurvensteifigkeit zunimmt. Eine Erhöhung des Luftdrucks reduziert allerdings die Auflagefläche des Reifens. Schubmodul und Auflagefläche des Reifens entwickeln sich gegenläufig, wenn der Luftdruck steigt. Bei niedriger Vertikallast ist die Verringerung der Auflagefläche des Reifens, die durch die Erhöhung des Luftdrucks entsteht, größer als die Erhöhung des Schubmoduls, weshalb die Kurvensteifigkeit abnimmt. Wenn die Vertikallast hoch ist, wird die Erhöhung des Schubmoduls durch den Anstieg des Luftdrucks allerdings dominant, sodass die Kurvensteifigkeit zunimmt. Um die Kurvensteifigkeit zu maximieren, müssen die Charakteristiken des Reifens und die Last genau bedacht und ausbalanciert werden.

Seitenkraft des Reifens in Bezug auf Fahren und Bremsen

Aus der Vogelperspektive betrachtet: Die Bodenhaftungskraft, die senkrecht zur Drehrichtung des Reifens erzeugt wird, nennt sich Seitenkraft. Es ist wichtig, diese Seitenkraft in Bezug auf Fahren und Bremsen des Fahrzeugs zu verstehen. Wird das Gas- oder Bremspedal betätigt, wird die Bodenhaftungskraft des Reifens zum Fahren oder Bremsen genutzt, was zu einer Verminderung der Menge an Seitenkraft führt, die selbst bei identischen Schräglaufwinkeln erzeugt werden kann. Das wird in Schaubild 2-1-4 gezeigt. Obwohl es Kammscher Kreis heißt, zeigt das Schaubild tatsächlich eine ovale Form. Sie ist nicht perfekt rund, da Längsreibung und Seitenreibung beim Reifen unterschiedlich auftreten. Da sich Beschleunigen und Bremsen bei einem Rennwagen ständig wiederholen, hat Reibung, die in diagonaler Richtung auftritt, einen großen Einfluss auf die Rundenzeiten.

Schaubild 2-1-4 Kammscher Kreis. Die Seitenführungskraft des Reifens wird vom Schräglaufwinkel beeinflusst. Der ovale Umfang des Kammschen Kreises zeigt die maximale Seitenführungskraft.

2-2 Stationäre Kreisfahrt

▶ Das Kurvenverhalten hängt von der Momentbalance an den Vorder- und Hinterreifen ab

Definition der Lenkbalance

Wird ein Auto mit konstantem Lenkwinkel und konstanter Geschwindigkeit gefahren, beschreibt es einen runden Kurs mit festem Radius. Das ist die sogenannte stationäre Kreisfahrt, auf die man sich in der Automobillehre oft bezieht. Die Beobachtung eines Autos auf stationärer Kreisfahrt kann die fundamentalen Eigenschaften der Fahrzeugbewegung aufzeigen.

Stellen wir uns beispielsweise ein Auto in stationärer Kreisfahrt vor, bei dem die Geschwindigkeit allmählich erhöht wird. Wenn sich das Moment des Vorderrads beim Beschleunigen des Autos verringern sollte, wird sich der Kurvenradius mit zunehmender Geschwindigkeit erhöhen (die Fahrlinie wird erweitert). Folglich muss der Lenkwinkel erhöht werden, um die ursprüngliche stationäre Kreisfahrt beibehalten zu können.

Wenn sich andererseits das Moment des Vorderrads erhöht, nimmt der Kurvenradius beim Beschleunigen des Autos ab (die Fahrlinie wird kürzer). Der Lenkwinkel muss also verringert werden, um die ursprüngliche Fahrlinie beizubehalten. Ein zu kleiner Lenkwinkel bei der Erhöhung der Geschwindigkeit wird Untersteuern (US) genannt, während man bei einem zu großen Lenkwinkel vom Übersteuern (ÜS) spricht. Wenn der Kurvenradius ohne Beeinflussung durch Geschwindigkeitsunterschiede beibehalten werden kann, spricht man von neutralem Lenkverhalten (NL). Diese unterschiedlichen Lenkzustände des Autos werden Lenkeigenschaften genannt. Es gilt zu beachten, dass ein übersteuerndes Auto bei einer bestimmten Geschwindigkeit einen Kurvenradius von „0" erreicht (Schaubild 2-2-2). Ein Kurvenradius von „0" bedeutet, dass ein Auto eine Drehung vollzieht (es schleudert). Die Geschwindigkeit, bei der ein Auto in eine Drehbewegung übergeht, nennt man kritische Geschwindigkeitsstabilität.

Schaubild 2-2-1 Änderungen des Bogens des Fahrzeugs bei erhöhter Geschwindigkeit

ÜS: Moment des Vorderrads > Moment des Hinterrads
US: Moment des Vorderrads < Moment des Hinterrads
NL: Moment des Vorderrads = Moment des Hinterrads

Schaubild 2-2-2 Korrelation zwischen Geschwindigkeit und Kurvenradius bei stabilem Lenkwinkel

Tabelle 2-2-1 Lenkeigenschaften

	US	NL	ÜS
M : Moment zum Einlenken des Autos	M Vorderrad < M Hinterrad	M Vorderrad = M Hinterrad	M Vorderrad > M Hinterrad
β : Schräglaufwinkel	β Vorderrad > β Hinterrad	β Vorderrad = β Hinterrad	β Vorderrad < β Hinterrad

Beziehung zwischen Lenkeigenschaft und Schräglaufwinkel

Es gibt einen interessanten Zusammenhang zwischen dem Schräglaufwinkel des Vorderrads und dem des Hinterrads (β Vorderrad, β Hinterrad) und den Lenkeigenschaften. Sehen Sie sich das Schaubild 2-2-3 an. Bei der stationären Kreisfahrt gilt: Wenn vorderer und hinterer Schräglaufwinkel gleich β Vorderrad > β Hinterrad, dann liegt Untersteuern vor. Wenn β Vorderrad = β Hinterrad liegt neutrales Lenkverhalten vor und wenn β Vorderrad < β Hinterrad, kommt es zum Übersteuern. Dieser Zusammenhang besteht auch, wenn eine andere Seitenkraft als die Seitenführungskraft wirkt, und unabhängig davon, ob die Seitenführungskraft proportional zum Schräglaufwinkel ist oder nicht. Der Zusammenhang ist geometrisch festgelegt, wenn ein Auto auf einer stationären Kreisfahrt ist.

Schaubild 2-2-3 Die Lenkeigenschaft ändert sich aufgrund des Unterschieds im Schräglaufwinkel zwischen Vorder- und Hinterreifen.

TIPPS Wenn wir über das Kurvenverhalten und über Aufhängungsbewegungen sprechen, wird die Kraft, die vom Fahrzeug abgeleitet wird, häufig in drei Drehbewegungen unterteilt, die im Schaubild 2-2-4 abgebildet sind. Die erste ist eine Drehung, die in der Mitte der Fahrzeuglänge auftritt (x-Achse) und „Wanken" genannt wird. Die zweite Drehung tritt in der Mitte der Querachse (y-Achse) auf und wird „Nicken" genannt. Die dritte Drehung tritt in der Mitte der vertikalen Achse auf (z-Achse) und wird „Gierbewegung" genannt. Diese Begriffe spielen immer wieder eine Rolle, sodass es sinnvoll ist, sie sich zu merken.

Schaubild 2-2-4 Die drei Drehbewegungen, die bei einem Fahrzeug auftreten

z-Achse
Gierbewegung
y-Achse
Wanken
x-Achse
Nicken

2-3 Die Reaktion eines Autos auf Änderungen des Lenkwinkels

▶ Die automobile Bewegung ist ein oszillierendes Phänomen

Einlenkmechanismus

Bei der Beobachtung eines Autos auf stationärer Kreisfahrt offenbaren sich die Grundlagen der Fahrzeugbewegung. Es zeigt sich auch, wie das Auto auf Änderungen des Lenkwinkels reagiert, was ein weiteres wichtiges Thema in der Analyse der Fahrzeugbewegung darstellt.

Sehen wir uns anhand von Schaubild 2-3-1 nun Schritt für Schritt den Einlenkmechanismus an. (1) Wird das Lenkrad eines geradeaus fahrenden Autos eingelenkt, versucht das Auto aufgrund des Trägheitsmoments weiter geradeaus zu fahren. In diesem Moment wird ein Schräglaufwinkel zwischen der Richtung, in die die Vorderräder zeigen und dem Moment des geradeaus fahrenden Autos erzeugt, was zum Auftreten der Seitenführungskraft führt. Da die Seitenführungskraft mit der Verformung des Reifens einhergeht, kommt es zu einer leichten Zeitverzögerung. (2) Die Seitenführungskraft löst eine Gierbewegung (Drehbewegung) aus. Zu diesem Zeitpunkt bewegen sich die Hinterräder aufgrund des ursprünglichen Trägheitsmoments weiter geradeaus. (3) Nach einer Zeitverzögerung entsteht auch bei den Hinterreifen ein Schräglaufwinkel, und es entsteht eine Seitenführungskraft. (4) Wenn sowohl die vordere als auch die hintere Seitenführungskraft stabil werden, steht die Gierrate (Giergeschwindigkeit) fest. Das Auto befindet sich nun in einer stetigen Kurve.

Es ist wichtig zu verstehen, dass eine Gierbewegung nicht simultan zur Lenkbewegung auftritt. Es gibt eine leichte Phasendifferenz aufgrund der Beziehung zwischen dem Trägheitsmoment des Autos und dem Auftreten der Seitenführungskraft der Reifen.

Schaubild 2-3-1 Einlenkmechanismus

1) Wenn ein Auto eine gerade Linie fährt, versucht die Trägheit, das Auto weiter geradeaus laufen zu lassen und erzeugt einen Schräglaufwinkel.
2) Die Gierbewegung (Drehbewegung) setzt ein und die Hinterräder versuchen, nach außen auszubrechen, während gleichzeitig eine Seitenbewegung nach innen wirkt, sodass das Moment einer geraden Linie des Autos beibehalten wird.
3) Wenn die Gierbewegung zunimmt, entsteht an den Hinterreifen ein Schräglaufwinkel.
4) Wenn vordere und hintere Seitenführungskräfte mit der Fliehkraft ins Gleichgewicht kommen, geht das Auto in eine stationäre Kurvenfahrt über.

Lenkeigenschaften und Fahrzeugreaktion

Die Reaktion des Autos auf die Lenkbewegung des Fahrers hängt von den Lenkeigenschaften und Geschwindigkeit des Autos ab. Schaubild 2-3-2 zeigt, wie das Auto auf eine impulsartige (scharf einlenken und dann zurück) Lenkaktion reagiert. Ein Auto mit Untersteuern, das mit einer bestimmten Geschwindigkeit gefahren wird, wird anfänglich instabil werden und dann allmählich einen stabilen Zustand erreichen. Ein Auto mit neutralem Lenkverhalten wird nicht instabil, sondern erreicht sofort einen stabilen Zustand. Ein Auto mit Übersteuern, das über der kritischen Geschwindigkeitsstabilität bewegt wird, kommt sofort ins Schleudern. Diese unterschiedlichen Reaktionen wurden in Tabelle 2-3-1 zusammengefasst.

Autos mit Untersteuern oder mit neutralem Lenkverhalten werden letztendlich stabil. Ein Auto mit Übersteuern hingegen verliert an Stabilität, wenn es Geschwindigkeiten erreicht, die über der kritischen Geschwindigkeitsstabilität liegen.

Schaubild 2-3-2 **Graphik der Schleppkurve und der Gierrate bei impulsartiger Lenkbedingung.**

Tabelle 2-3-1

US		Oszillierende Dämpfung
NL	Nicht-oszillierende Dämpfung	
ÜS		Schleudern

↑ Kritische Geschwindigkeitsstabilität — Geschwindigkeit →

Zusammenfassung der Reaktion von Autos mit unterschiedlichen Lenkeigenschaften: Untersteuern (US), neutrales Lenkverhalten (NL) und Übersteuern (ÜS). Ein übersteuerndes Auto kommt ins Schleudern, nachdem es die kritische Geschwindigkeitsstabilität überschritten hat.

Anwendung der Schwingungstheorie auf die Fahrzeugbewegung

Erinnern wir uns an die Schwingungsdifferenz im Zusammenhang mit dem Dämpfungsgrad in Abschnitt 1-5. In diesem Abschnitt konnten wir feststellen, dass eine geringe Dämpfung auftritt, wenn der Dämpfungsgrad kleiner 1 ist. Das bedeutet, dass die Schwingungsreaktion oszilliert. Ist der Dämpfungsgrad größer 1, also bei überkritischer Dämpfung, wird die Schwingungsreaktion ohne Oszillation gedämpft. Ist der Dämpfungsgrad gleich 1, liegt ein Zustand der kritischen Dämpfung vor. Hier können wir feststellen, dass das Verhalten der Schwingungskomponenten, die aus Masse, Feder und Dämpfer bestehen, dem des gesamten Autos gleicht.

Die Schwingungskomponenten Masse, Feder und Dämpfer sowie die Fahrzeugdynamik können mithilfe bestimmter abstrakter Konzepte wie Dämpfungsgrad und Resonanzfrequenz (oder Eigenfrequenz) verstanden werden. Man erkennt, dass es keine Unterschiede gibt, und beide können als Schwingungssysteme angesehen werden. Mit anderen Worten: Die Fahrzeugbewegung ist eine Art Schwingungsphänomen.

Als Beispiel sehen wir uns Schaubild 2-3-2 an. Die Gierdämpfung eines untersteuernden Autos verfügt über einen Dämpfungswert, der kleiner 1 ist. Deshalb ist die Reaktion oszillierend. Die Gierdämpfung eines übersteuernden Autos besitzt einen Dämpfungsgrad, der größer 1 ist. Hier ist die Reaktion also nicht-oszillierend. Die Gierdämpfung eines Autos mit neutralem Lenkverhalten ist in einem Zustand kritischer Dämpfung, besitzt einen Dämpfungsgrad von 1 und die Reaktion ist nicht-oszillierend. (Gierdämpfung bezieht sich auf den Effekt der Dämpfung einer Gierbewegung.)

2-4 Fahrzeugreaktion auf periodische Lenkbewegungen

▶ Fahrzeugeigenschaften mithilfe des Bode-Diagramms verstehen

Lenkeigenschaften und Reaktion auf periodische Lenkbewegungen

Im letzten Abschnitt haben wir erklärt, dass die Fahrzeugbewegung ein Schwingungsphänomen ist. Jetzt wollen wir uns ansehen, wie die Lenkeigenschaften die Fahrzeugeigenschaften insgesamt beeinflussen, in dem wir die Fahrzeugreaktion unter Bezugnahme auf die Schwingungstheorie untersuchen. Wir werden beobachten, wie ein Auto bei einer stabilen Geschwindigkeit reagiert, wobei eine periodische Bewegung des Lenkrads ausgeführt und es dann in die neutrale (gerade) Stellung zurückgedreht wird. Für diese Beobachtung ändern wir auch die Geschwindigkeit des Lenkens (Lenkfrequenz).

Rufen wir uns das Bode-Diagramm in Erinnerung, das in Abschnitt 1-6 erklärt wurde. Schaubild 2-4-1 ist ein Bode-Diagramm, das die Antwortfrequenz der Gierrate im Verhältnis zur periodischen Lenkbewegung illustriert. Ist die Lenkfrequenz extrem niedrig (das Lenkrad wird sehr langsam gedreht), stellt die Verstärkung (Amplitudenverhältnis) im Prinzip die Gierrate des Übersteuerns, neutralen Lenkverhaltens und des Untersteuerns einer stationären Kreisfahrt dar. Bei steigender Lenkfrequenz erhöht sich das Amplitudenverhältnis bei untersteuernden Autos und erreicht eine Spitze bei einer bestimmten Frequenz. Die Verstärkung erhöht sich ebenfalls. Bei neutralen und übersteuernden Autos gibt es keinen Spitzenwert, und die Verstärkung (Amplitudenverhältnis) verringert sich mit zunehmender Lenkfrequenz immer mehr.

Sehen wir uns nun das Liniendiagramm der Phase an. Die Phasenverzögerung nimmt bei allen Arten von Lenkeigenschaften zu, wenn die Lenkfrequenz steigt. Bei untersteuernden Autos ist die Phasenverzögerung aber minimal. Das bedeutet, dass ein zum untersteuerndes Auto am schnellsten auf Lenkbewegungen reagiert.

Schaubild 2-4-1 **Konzeptionelle Grafik, die die Reaktion der Gierrate im Verhältnis zu periodischen Lenkmanövern von Autos mit unterschiedlichen Lenkeigenschaften zeigt.**

Vier interessante Punkte im Bode-Diagramm

Kommen wir nun zu der Erklärung, wie das Bode-Diagramm für die praktische Anwendung implementiert werden kann. Es gibt mehrere interessante Punkte im Bode-Diagramm. Sehen wir uns das Frequenzverhalten der Gierrate an. Zunächst fällt die Verstärkung bei sehr niedriger Frequenz auf (siehe (1) im Schaubild 2-4-2). Dieser Wert gleicht im Grunde dem Wert der stationären Kreisfahrt. Der zweite beachtenswerte Punkt ist die Höhe der Verstärkungsspitze (siehe (2) im Schaubild 2-4-2). Autos mit starkem Untersteuern besitzen eine höhere Resonanz aufgrund der Abnahme der Gierdämpfung und somit nimmt die Verstärkung zu. Es gibt allerdings keine Spitzen in den Verstärkungen bei Autos mit neutralem Lenkverhalten oder Übersteuern. Um die optimale Lenkeigenschaft zu erhalten, sollte eine moderate Resonanzspitze sichergestellt werden. Der dritte beachtenswerte Punkt ist die Resonanzfrequenz (siehe (3) im Schaubild 2-4-2). Je höher die Resonanzfrequenz, desto schneller die Reaktion, sodass der Fahrer eine präzisere Rückmeldung vom Lenkrad erhalten kann. Der vierte beachtenswerte Punkt ist die Phasenverzögerung (siehe (4) im Schaubild 2-4-2). Ist sie hoch, entwickelt sich die Gierrate langsamer. Deshalb ist die Minimierung der Phasenverzögerung der richtige Weg, um eine schnellere Lenkreaktion zu erhalten.

Schaubild 2-4-2 Vier wichtige Punkte im Bode-Diagramm

Verstärkung
(1)
(2)
(3)
Frequenz
1Hz
Phasendifferenz
(4)
Frequenz
1Hz

2-5 Wankbewegung und Fahrzeugbewegung

▶ Wankbewegungen zum Anpassen der Lenkeigenschaft nutzen

Die Karosserie des Autos neigt sich in der Kurve nach außen. Bis jetzt haben wir die Effekte der Wankbewegungen absichtlich ausgelassen, um unseren Diskurs zu vereinfachen. Die Fahrzeugbewegung wird stark von Wankbewegungen beeinflusst. Sehen wir uns die Auswirkungen von Wankbewegungen bezogen auf das Gesamtverhalten eines Fahrzeugs an.

Schaubild 2-5-1

Auswirkungen der Wankbewegung auf die Lenkeigenschaft

In Schaubild 2-5-2 sehen wir, dass sich selbst bei einer Verdoppelung der Last die Seitenführungskraft nicht um denselben Betrag erhöht. Das liegt daran, dass es einen abnehmenden Betrag der Seitenführungskraft gibt, wenn die Last sich erhöht. Im Schaubild zeigt sich eine Sättigungskurve. Fährt ein Auto in eine Kurve, findet eine Achsentlastung vom inneren zum äußeren Rad statt. Die Summe der Seitenführungskräfte der inneren und äußeren Räder wird kleiner, wenn es um die Achsentlastung im Vergleich zur Summe ohne Achsentlastung geht. Mit anderen Worten: Je größer die Beträge der Achsentlastung, desto kleiner die Beträge der Seitenführungskraft.

Schaubild 2-5-2 Zusammenhang zwischen Reifenlast und Kurvensteifigkeit. Last und Kurvensteifigkeit sind nicht proportional zueinander. Deshalb verdoppelt sich die Kurvensteifigkeit nicht, selbst wenn die Last sich verdoppelt.

Schaubild 2-5-3 Vergleich zwischen einem Auto mit einem hohen Betrag an Achsentlastung und einem Auto mit kleinerem Betrag. Bei einem Auto mit kleinem Achsentlastungsbetrag beträgt die Seitenführungskraft F1 die Hälfte der Summe des inneren Rads A und des äußeren Rads B. Bei einem Auto mit höherem Achsentlastungsbetrag beträgt die Seitenführungskraft F2 die Hälfte der Summe von A' und B'. Ein Auto mit geringerem Achsentlastungsbetrag besitzt eine größere Gesamtseitenführungskraft.

Lenkung bei unterschiedlicher Lastverlagerung an Front und Heck

Da sich das Auftreten der Seitenführungskraft an den Reifen im Verhältnis zur vertikalen Last im Sinne einer Sättigung ändert, wenn die Achsentlastung über die Wankbewegung bei Vorder- und Hinterreifen unterschiedlich ist, ändert sich auch die Lenkeigenschaft. Ist die Achsentlastung an den Vorderrädern größer als die Achsentlastung an den Hinterrädern, untersteuert das Auto. Ist die Achsentlastung an den Vorderrädern kleiner als die Achsentlastung an den Hinterrädern, übersteuert das Auto.

Der Betrag der Achsentlastung zwischen links und rechts wird von der Balance des Effekts der externen Kraft in Bezug auf die Achsentlastung sowie des Effekts der reagierenden Wanksteifigkeit definiert. Die Beziehung wird hauptsächlich von der vorderen und hinteren Wankzentrumshöhe, dem Wanksteifigkeitsverhältnis und der Spurbreite bestimmt. Ohne zu sehr ins Detail zu gehen: Die Höhe des Wankzentrums steht in Zusammenhang mit dem Moment der externen Kraft, das von der Seitenkraft des Reifens erzeugt wird. Das Wanksteifigkeitsverhältnis steht in Zusammenhang mit der Verteilung des Moments der externen Kraft auf Front und Heck und die Spur steht in Zusammenhang mit dem von der Achsentlastung erzeugten Moment. Der Betrag der Achsentlastung wird von diesen Beziehungen bestimmt und hilft, die Auswirkungen der Wankbewegung auf die Lenkeigenschaft zu klären, wie in Tabelle 2-5-1 zusammengefasst.

Tabelle 2-5-1 **Änderung der Lenkeigenschaften und Tuning der Aufhängung**

	US	ÜS
Wankzentrum – Vorderrad	Hoch	Niedrig
Wankzentrum – Hinterrad	Niedrig	Hoch
Wanksteifigkeitsverhältnis	Groß	Klein
Spurweite – Front	Klein	Groß
Spurweite – Heck	Groß	Klein

Schaubild 2-5-4

Das Untersteuern nimmt zu, wenn die Höhe des Wankzentrums der Vorderräder angehoben oder die Höhe des Wankzentrums der Hinterräder gesenkt wird.

Das Untersteuern nimmt zu, wenn das Wanksteifigkeitsverhältnis der Vorderreifen erhöht wird.

Das Untersteuern nimmt zu, wenn die Spurweite der Vorderräder reduziert oder die Spurweite der Hinterräder vergrößert wird.

2-6 Schwingung von gefederter und ungefederter Masse

▶ Eine Theorie, die beim Tuning der Aufhängung nicht ignoriert werden darf

Vertikale Schwingung hat direkten Einfluss auf den Fahrkomfort des Autos und die Bodenhaftung der Reifen. Eine starke Schwingung kann die Fahrt unzumutbar werden lassen und die Bodenhaftung der Reifen so stören, dass die Traktion verloren geht. Um das zu vermeiden, müssen Federn und Stoßdämpfer sorgfältig abgestimmt werden. Dieser Abschnitt bietet eine Einführung in die Grundlagen der vertikalen Schwingungen, die für das Tuning der Aufhängung sehr wichtig sind.

Modus der Schwingung

Die gefederte Masse bezieht sich auf die von der Aufhängung gestützte Gesamtmasse. Die ungefederte Masse ist die Gesamtmasse zwischen Aufhängung und Reifen. Hier konzentrieren wir uns auf die prellende und nickende Schwingung der gefederten Masse und auch auf die vertikale Schwingung der ungefederten Masse.

Schaubild 2-6-1 ist eine vereinfachte Illustration der Schwingung, wobei die Vorder- und Hinterräder das gesamte Auto stützen. In diesem Modell wird die gefederte Masse entweder nach oben oder unten verlagert (insgesamt zwei Richtungen). Auch die ungefederte Masse wird nach oben oder unten verlagert (insgesamt zwei Richtungen). Somit gibt es vier Richtungen der Verlagerung, vier Freiheitsgrade. Das bedeutet, dass es vier Eigenfrequenzen gibt. Die Hauptresonanz ist die Prellresonanz. Das ist die Schwingung, die bei der gefederten Masse an Front und Heck auftritt (Front und Heck strecken und ziehen sich simultan zusammen). Die Sekundärresonanz ist die Nickresonanz, bei der die gefederte Masse von Front und Heck in entgegengesetzte Richtungen schwingt (wenn die Front sich streckt, zieht das Heck sich zusammen und wenn die Front sich zusammenzieht, streckt sich das Heck). Bei der ungefederten Masse treten tertiäre und quartäre Resonanzen auf.

Schaubild 2-6-1 Vereinfachtes Schwingungsmodell, in dem die Karosserie von den Vorder- und Hinterrädern gestützt wird. Es gibt vier Richtungen der Auslenkung.

Karosserie
Aufhängung
Ungefederte Masse
Reifen
Vorderrad
Hinterrad

Schaubild 2-6-2 Modus der Schwingung

Hauptresonanz: Prellmodus. Es findet ein gleichzeitiges Ausdehnen und Zusammenziehen der vorderen und hinteren Aufhängung in derselben Richtung statt, sodass die Karosserie springt.

Sekundärresonanz: Nickmodus. Es findet ein Ausdehnen und Zusammenziehen der vorderen und hinteren Aufhängung in entgegengesetzter Richtung statt, was zu einer Nickbewegung der Karosserie führt.

Tertiäre und quartäre Resonanz: Resonanzmodus bei der ungefederten Masse

Schaubild 2-6-3

Einfluss des Aufhängungsalgorithmus auf die vertikale Schwingung

Schwingungsgrad
Zunahme der Dämpfkraft
Wenn die Dämpfkraft der Aufhängung erhöht wird.
Schwingungsfrequenz

Schwingungsgrad
Wenn die gefederte Masse reduziert und die Federrate erhöht wird.
Schwingungsfrequenz

Schwingungsgrad
Prellmodus
Nickmodus
Ungefederte Masse Resonanzmodus
(Vordere und hintere Resonanzmodi treten mit derselben Schwingungsfrequenz auf)
Wenn die ungefederte Masse reduziert und die Längssteifigkeit der Reifen erhöht wird.
Schwingungsfrequenz

Auswirkungen des Tunings der Aufhängung auf den Schwingungsmodus

Karosserieschwingungen haben einen negativen Einfluss auf die Bodenhaftung der Reifen und den gesamten Fahrkomfort und sollten soweit wie möglich reduziert werden. Die Schwingung der gefederten Masse beeinflusst auch das aerodynamische Verhalten, besonders bei Rennfahrzeugen.

Es gilt zu beachten, dass die Schwingung von gefederter und ungefederter Masse folgende Eigenschaften aufweist. Dieses Wissen sollte beim Tuning der Aufhängung nützlich sein.

1) **Die Erhöhung der Dämpfkraft hilft, die Schwingung der gefederten Masse um die Resonanzfrequenz herum zu reduzieren. Allerdings erhöht dies die Schwingung in anderen Bereichen (siehe Schaubild 2-6-3, obere Grafik).**
2) **Die Erhöhung der Dämpfkraft erhöht auch die Resonanzfrequenz der gefederten Masse (siehe Schaubild 2-6-3, obere Grafik).**
3) **Eine Veränderung der gefederten Masse oder der Federrate beeinflusst die Resonanz der gefederten Masse, hat aber nur geringen Einfluss auf die ungefederte Masse (siehe Schaubild 2-6-3, mittlere Grafik).**
4) **Eine Änderung der ungefederten Masse oder der Längssteifigkeit der Reifen beeinflusst die Resonanz der ungefederten Masse, hat aber nur geringen Einfluss auf die Massenschwingung (siehe Schaubild 2-6-3, untere Grafik).**

Nickkontrolle

Wenn ein Auto in einer geraden Linie gefahren wird, kommt es bei der Einwirkung der Straßenoberfläche auf die Hinterräder zu einer Zeitverzögerung, die sich aus „Radstand / Fahrzeuggeschwindigkeit" ableiten lässt. Indem die Resonanzfrequenz der gefederten Masse der Hinterräder etwas höher als die der Vorderräder eingestellt wird, holt die Schwingung der Hinterräder auf und gleicht sich der Schwingung der Vorderräder an, sodass das Nicken minimiert wird.

Schaubild 2-6-4

Kontrolle der Nickbewegung. Durch Erhöhung der Resonanzfrequenz der hinteren gefederten Masse kann das Nicken minimiert werden.

Aufhängungsverlagerung
Zeit
Resonanzfrequenzen der vorderen und hinteren gefederten Masse sind gleich.
Zeit
Resonanzfrequenz der hinteren gefederten Masse > Resonanzfrequenz der vorderen gefederten Masse
Nickwinkel
Zeit
Zeit

2-7 Was macht ein Hochleistungsfahrzeug aus?

▶ Das Fahrzeugverhalten steckt in den Hinterrädern

Resonanzfrequenz von Gierrate und Lenkeigenschaft

Allgemein kann man sagen, dass ein Auto schnell reagieren sollte und als Hochleistungsfahrzeug gelten kann, wenn die Resonanzfrequenz der Gierrate hoch ist. Die Verbesserung der Kurvensteifigkeit der Hinterreifen oder eine Gewichtsreduzierung beim Auto sind Beispiele dafür, wie die Resonanzfrequenz der Gierrate erhöht werden kann.

Schaubild 2-7-1 zeigt, wie die Haftung der Vorder- und Hinterreifen sich auf das gesamte Fahrzeugverhalten auswirken kann. Aus diesem Schaubild wird ersichtlich, dass die Erhöhung der Haftung der Hinterreifen das Untersteuern verstärkt und die Resonanzfrequenz der Gierrate erhöht. Umgekehrt verringert die Erhöhung der Haftung der Vorderreifen die Resonanzfrequenz der Gierrate und führt zu einem stärkeren Übersteuern. Dagegen reduziert die Erhöhung der Haftung der Hinterreifen die Phasenverzögerung, während die Erhöhung der Haftung der Vorderreifen die Phasenverzögerung verstärkt.

Wie bereits dargelegt, hat der Haftungsgrad der Hinterreifen einen signifikanten Effekt auf die Gesamtleistung des Fahrzeugs. Bei der Modifizierung des Aufhängungssystems sollte zunächst für eine ausreichende Haftung der Hinterreifen gesorgt werden. Als Nächstes sollte der Haftungsgrad der Vorderreifen gut ausbalanciert werden. Solche Schritte müssen verstanden werden, da sie für die Verbesserung der Fahrzeugleistung entscheidend sind.

Schaubild 2-7-1 Zusammenhang zwischen Reifenhaftung, Lenkreaktion und Lenkeigenschaft

TIPPS Wenn das Trägheitsmoment der Gierbewegung des Fahrzeugs mit $I=mK2$ ausgedrückt werden kann, steht $K=\sqrt{I/M}$ für den Trägheitsradius der Gierbewegung. „I“ steht für das Trägheitsmoment der Gierrate, während „m“ die Masse des Fahrzeugs bezeichnet.

Einstufen des Ansprechverhaltens von Fahrzeugen

Beim Ansprechverhalten von Fahrzeugen handelt es sich um ein komplexes Thema, aber indem wir die Fahrzeugbewegung (wie unter 1-1 erklärt) als eine Bewegungsgleichung begreifen, können wir dieses Thema besser verstehen. Außerdem können wir die Bewegungseigenschaften eines Fahrzeugs anhand der Konzepte der Seitenbeschleunigung und der Lenkfrequenz kategorisieren, wie in Schaubild 2-7-2 dargestellt.

Bisher haben wir uns bei der Betrachtung des Ansprechverhaltens auf (2) gewöhnliche Kurveneigenschaften in einem (3) linearen Bereich konzentriert. Ein linearer Bereich bezieht sich in diesem Fall auf das hypothetische Verständnis einer Situation, in der die Kurvensteifigkeit stabil ist, und zwar unabhängig von der Fahrtsituation. Andererseits bezieht sich das Ansprechverhalten in einem (4) nicht-linearen Bereich auf eine Situation, in der die Kurvensteifigkeit gesättigt ist. Bei Rennautos ist dieser Bereich besonders wichtig. Doch selbst wenn wir uns den nicht-linearen Bereich näher ansehen, treten Grundsätze des linearen Bereichs auf. Wenn wir also die Balance zwischen der Seitenführungskraft und dem Moment der Vorder- und Hinterräder entsprechend berücksichtigen, kann er oft wie eine Anwendung des linearen Bereichs behandelt werden. Außerdem ist es von Vorteil, den (5) Bereich der Grenzeigenschaften so weit wie möglich vom Startpunkt zu positionieren.

Schaubild 2-7-2 Kategorie von Bewegungseigenschaften eines Fahrzeugs

TIPPS Ein typisches Beispiel für einen nicht-linearen Fahrbereich ist die sogenannte Rückwärtslenkung. Wir haben bereits unter 1-2 erklärt, dass man die Lenkeigenschaften anhand des Grads des Schräglaufwinkels bei gewöhnlichen Kurven bestimmen kann. Jetzt wollen wir einmal untersuchen, welche Rückwärtslenkung bei einem Fahrzeug mit den Eigenschaften, die im Schaubild 2-7-3 gezeigt werden, vorliegt. Wenn Fahrzeuge mit ähnlichen Eigenschaften gewöhnliche Kurven fahren und die Seitenbeschleunigung niedrig ist, wird der Schräglaufwinkel des Vorderrads größer und das Untersteuern des Fahrzeugs macht sich bemerkbar. Wenn allerdings die Seitenbeschleunigung erhöht wird, müssen die Reifen Kraft aufwenden, um den Vorgang auszubalancieren. Der Schräglaufwinkel wird also größer und die Seitenführungskraft erreicht den Sättigungsbereich. Das führt zu einem vergrößerten Schräglaufwinkel des Hinterrads, denn die Seitenbeschleunigung erhöht sich bis zu einem gewissen Punkt, sodass es zum Übersteuern kommt und die Bewegung dadurch instabil wird. Diese Situation, in der die Lenkeigenschaften sich abhängig von der Seitenbeschleunigung verändern, nennt man Rückwärtslenkung.

Schaubild 2-7-3

3-1 Temperatur und Druck

▶ Molekularbewegung ist die Ursache für Temperatur und Druck

Heute wissen wir, dass Wärme, Temperatur und Druck allesamt durch die Molekularbewegung verursacht werden. Zu dieser Erkenntnis kam man erst im 19. Jahrhundert und erst im 20. Jahrhundert wurde sie als bewiesene Theorie anerkannt. Um die Effizienz und den Energieverlust in Motoren und im Bereich der Aeromechanik (Hydromechanik), auf die wir später eingehen werden, richtig zu verstehen, sollten wir uns zunächst mit der Molekularbewegung und ihren Auswirkungen auf die Temperatur und den Druck befassen.

Unregelmäßige molekulare Aktivität in einem geschlossenen Raum

Stellen wir uns einen gasförmigen Stoff in einem versiegelten Behälter vor. Eine makroskopische Betrachtung des gasförmigen Stoffes könnte ergeben, dass die Temperatur und der Druck beide stabil sind. Das nennt man Gleichgewichtszustand. Von einer mikroskopischen Perspektive aus betrachtet lässt sich jedoch erkennen, dass sich innerhalb des Behälters eine Unzahl von Gasmolekülen unregelmäßig hin- und herbewegen. Ein Molekül bewegt sich vielleicht nur langsam, während ein anderes eine extrem hohe Geschwindigkeit aufweisen kann. Diese Moleküle kollidieren miteinander und mit den Wänden des Behälters und ändern ihre Geschwindigkeit, während sie sich bewegen.

Schaubild 3-1-1 Gas innerhalb eines versiegelten Behälters im Gleichgewichtszustand

Schaubild 3-1-2 **Die Boltzmann-Konstante verbindet die Maße der Mechanik und Thermodynamik**

Temperatur ist ein Maß für die mittlere kinetische Energie der Moleküle

Innerhalb des Behälters bewegen sich zahllose Gasmoleküle mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten umher. Aus energetischer Sicht weisen die Gasmoleküle unterschiedliche Mengen an kinetischer Energie auf. Die Temperatur ist im Grunde das numerische Maß für die durchschnittliche kinetische Energie eines jeden Moleküls, das sich auf unregelmäßige Art und Weise und mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten umherbewegt. Mathematisch kann dies wie folgt ausgedrückt werden:

Durchschnittliche kinetische Energie pro Molekül = 3/2 kT

„T" steht dabei für die absolute Temperatur und „k" für die Boltzmann-Konstante. Das ist eine proportionale Konstante, die nicht von der Temperatur, der Dichte, dem Druck, der Menge oder der Art des Gases beeinflusst wird. Diese Gleichung verknüpft die mechanische Maßeinheit der kinetischen Energie mit der thermischen Maßeinheit der Temperatur. Es ist die Boltzmann-Konstante, die dabei als eine wichtige Brücke zwischen der mechanischen und der thermischen Maßeinheit fungiert.

Druck ist der Mittelwert der Kraft sich bewegender Moleküle

Wie im voranstehenden Schaubild 3-1-1 zu sehen, kollidieren Gasmoleküle kontinuierlich mit den Wänden des Behälters. Einige Moleküle bewegen sich mit hohen Geschwindigkeiten, während sich andere wiederum sehr langsam fortbewegen. Einige der Moleküle treffen senkrecht auf die Wand auf und andere treffen in einem Winkel auf. Daher verfügt jedes Molekül über eine andere Aufprallkraft.

Wenn wir jedoch den Druck messen, leiten wir im Grunde die durchschnittliche Aufprallkraft aus dem Pool an Molekülen ab, die sich unregelmäßig umherbewegen. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, zu verstehen, dass die durchschnittliche Aufprallkraft und der Druck in einem Gleichgewichtszustand ungeachtet der Richtung oder des Messpunktes gleich sind. Obwohl sich die Moleküle unregelmäßig und mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten umherbewegen, wird die Aufprallkraft von einem makroskopischen Standpunkt aus gesehen trotzdem gleichmäßig in alle Richtungen verteilt.

Schaubild 3-1-3 **Druck ist der Durchschnittswert der Kraft von sich bewegenden Molekülen**

Schaubild 3-1-4 **Im Gleichgewichtszustand ist der Druck in allen Richtungen konstant**

3-2 Die ideale Wärmekraftmaschine

▶ Die Eliminierung Energie verschwendender Wärmeübertragung: Der Carnot-Prozess

Der Motor ist eine Maschine, die Wärmeenergie in eine gewünschte Art mechanischer Energie umwandelt. Aber wodurch wird die Umwandlungseffizienz bei der Umwandlung von Wärmeenergie in mechanische Energie bestimmt? Die erste Person, die diesen Aspekt näher beleuchten konnte, war der französische Ingenieur und Physiker Sadi Carnot. Im 19. Jahrhundert gelang es Carnot, ein Verständnis dafür zu schaffen, wie hoch der ideale Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine sein sollte und wie sich dieser Wirkungsgrad mithilfe der Logik bestimmen lässt. Carnots Schlussfolgerung war entscheidend für die Entwicklung von Wärmekraftmaschinen.

Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832)

Carnots zwei Größen

Als Carnot sich daran machte, ein Verständnis für die ideale Wärmekraftmaschine zu entwickeln, legte er das Augenmerk auf zwei Größen. Damit die Wärmekraftmaschine funktionieren kann, müssen Temperaturunterschiede bestehen. Ohne solche Unterschiede in der Temperatur kann es zu keiner Wärmeübertragung kommen, was bedeutet, dass die Wärmekraftmaschine nicht funktionieren würde. Treten nach der erbrachten Arbeitsleistung jedoch unnötige Temperaturunterschiede innerhalb der Wärmekraftmaschine auf, würde dies eine Energie verschwendende Wärmeübertragung verursachen. Carnot verstand daher, dass im Hinblick auf die Arbeitsleistung (Energie) die ideale Wärmekraftmaschine nicht von einer Wärmeübertragung abhängig wäre.

Die zweite Größe, auf die er sich konzentrierte, war der Aspekt, dass, wenn sich das Volumen des Materials ändern darf, eine Wärmeübertragung auftreten kann, selbst wenn die Temperatur des Materials nicht verändert wurde. Das nennt man eine isotherme Zustandsänderung. Carnot dachte, dass bei der Verwendung einer isothermen Zustandsänderung Energie erzeugt werden könnte, ohne eine unnötige Wärmeübertragung zu verursachen. Basierend auf diesen Vorüberlegungen theoretisierte Carnot ein innovatives Konzept eines thermodynamischen Kreisprozesses, bei dem es zu keiner Energie verschwendenden Wärmeübertragung aufgrund unnötiger Temperaturunterschiede kommt.

Schaubild 3-2-1 Ablauf des Carnot-Prozesses

(1) Isotherme Ausdehnung
(2) Adiabatische Ausdehnung
(3) Isotherme Kompression
(4) Adiabatische Kompression
Heißes Wärmereservoir
Wärme
Luft
Kaltes Wärmereservoir
Bewegung der Wärme

Carnot-Prozess

Um die wahren Eigenschaften von Wärme eindeutig nachvollziehen zu können, erdachte Carnot einen Luftmotor, der aus einem heißen und einem kalten Wärmereservoir sowie einem von Luft umschlossenen Zylinder und einem Kolben bestand. Er untersuchte die Eigenschaften der Wärmeübertragung, indem er den Zylinder in Kontakt mit dem Wärmereservoir kommen ließ, und entwickelte den idealen thermodynamischen Kreisprozess. Der von ihm erfundene thermodynamische Kreisprozess ist in den Schaubildern 3-2-1 und 3-2-2 zu sehen.

1) Wenn der Zylinder in Kontakt mit dem heißen Wärmereservoir kommt, wird Wärme vom Reservoir an den Zylinder übertragen, wodurch sich die Luft innerhalb des Zylinders ausdehnt. Allerdings gilt es, wie gesagt, Temperaturunterschiede zu vermeiden, weshalb an dieser Stelle die Temperatur des Wärmereservoirs und der Luft im Zylinder auf demselben Wert gehalten werden müssen. Außerdem muss auch die Lufttemperatur konstant sein. Um das zu erreichen, muss die Luft langsam und schrittweise ausgedehnt werden. Die Ausdehnung oder Kompression von gasförmigen Stoffen durch eine kontrollierte konstante Temperatur wird isotherme Zustandsänderung genannt.

2) Als Nächstes muss der ausgedehnte Zylinder in Kontakt mit dem kalten Wärmereservoir kommen. Wenn dies jedoch geschieht, würde es zu einem Temperaturunterschied kommen. Um dies zu verhindern, wandte Carnot zunächst dort eine adiabatische Zustandsänderung an, bei der sich die Temperatur durch die Kompression erhöht und durch die Ausdehnung gesenkt wird. Carnot erkannte, dass die durch das heiße Wärmereservoir ausgedehnte Luft durch die Anwendung der adiabatischen Zustandsänderung noch weiter ausgedehnt werden konnte, wodurch die Lufttemperatur ohne eine Wärmeübertragung gesenkt wird. Es ist für diesen Prozess dennoch erforderlich, dass der Kolben sehr langsam bewegt wird.

3) Wenn sich die Lufttemperatur im Inneren so weit gesenkt hat, dass sie der Temperatur des kalten Wärmereservoirs entspricht, lässt man den Zylinder in Kontakt mit dem Reservoir kommen, wodurch die Wärme der Luft an das Reservoir übertragen wird, während die Luft komprimiert wird. Temperaturunterschiede gilt es ja zu vermeiden, weshalb die Wärme langsam und schrittweise mithilfe der isothermen Zustandsänderung übertragen wird.

4) Nach der isothermen Zustandsänderung wird die Luft durch Anwendung der adiabatischen Zustandsänderung komprimiert, um die Temperatur zu erhöhen. Wenn sie so weit komprimiert wurde, dass ihre Temperatur der des heißen Wärmereservoirs entspricht, kann der Prozess wieder mit der unter (1) beschriebenen isothermen Ausdehnung fortgesetzt werden, um den Kreislauf zu wiederholen.

Nach dem Durchlaufen der (1) isothermen Ausdehnung durch das heiße Wärmereservoir, der (2) Abkühlung durch die adiabatische Ausdehnung, der (3) isothermen Kompression durch das kalte Wärmereservoir und der (4) Erhitzung durch die adiabatische Kompression kehrt die Luft im Zylinder wie bereits erwähnt in ihren ursprünglichen Zustand zurück, wodurch Wärme ohne das Auftreten einer unnötigen Wärmeübertragung in Energie umgewandelt wird. Dieser thermodynamische Kreisprozess wurde nach seinem Erfinder benannt und heißt daher Carnot-Prozess.

Fünfzig Jahre nach Carnots Tod erblickte das erste Fahrzeug mit Benzinmotor das Licht der Welt. Das Bild zeigt ein Fahrzeug mit drei Rädern von Karl Benz.

Schaubild 3-2-2 Änderung von Luftdruck und -menge im Carnot-Prozess

Luftdruck
1) Isotherme Ausdehnung
2) Adiabatische Ausdehnung
3) Isotherme Kompression
4) Adiabatische Kompression
Luftmenge

3-3 Carnots Schlussfolgerung

▶ Überraschende Abstraktion der Wärmekraftmaschine

Zwei Wärmereservoir-Temperaturen bestimmen den Wirkungsgrad

Bislang geht man gemeinhin davon aus, dass der Carnot-Prozess der effizienteste thermodynamische Kreisprozess für die Verwendung mit einer Wärmekraftmaschine ist. Was Carnot jedoch auszeichnete, war sein Schluss, dass mithilfe des Carnot-Prozesses zu keinem Zeitpunkt zwei unterschiedliche Temperaturen innerhalb des Zylinders in Kontakt kommen. Deshalb stellt sein thermodynamischer Kreisprozess tatsächlich den idealen Motor dar. Carnots Schlussfolgerung, dass der Wirkungsgrad des thermodynamischen Kreisprozesses einzig und allein durch die hohen und niedrigen Temperaturen des Wärmereservoirs bestimmt wird, ist sogar noch verblüffender. Carnot hat nie eine Formel dafür aufgestellt, aber in den darauffolgenden Jahren entwickelte der britische Ingenieur William Thompson den folgenden mathematischen Ausdruck.

$$\frac{\text{Temperatur des kalten Wärmereservoirs}}{\text{Idealer Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses}} = 1 - \frac{\text{Temp. kaltes Res.}}{\text{Temp. heißes Res.}}$$

Schaubild 3-3-1 **Carnots Wärmekraftmaschine identifiziert die Hauptkomponenten nur auf der Basis von Wärme und Kraft in einem komplexen Wärmekraftmaschinensystem, das viele Faktoren beinhaltet, sehr präzise und schafft es dann ein abstraktes Modell einer Wärmekraftmaschine zu entwickeln.**

Heißes Wärmereservoir
+
Kaltes Wärmereservoir
+
Zylinder und Kolben

Carnot ließ sich nicht von der Tatsache entmutigen, dass Motoren kompliziert aufgebaut sind und aus verschiedenen Teilen bestehen, sondern wandte stattdessen den Carnot-Prozess auf den Wärmewirkungsgrad an und stellte die Theorie auf, dass die hohen und niedrigen Temperaturen des Wärmereservoirs die einzigen bestimmenden Faktoren für den Wirkungsgrad wären. (Auf dem Bild ist ein TwinPower Turbo V8-Benzinmotor der Marke BMW zu sehen.)

Die ultimative Abstraktion der Wärmekraftmaschine

Die Beziehung zwischen dem theoretischen Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses, dem Wärmereservoir und der Temperatur wurde hiermit verdeutlicht, aber die Schlussfolgerung, die Carnot gezogen hat, fördert auch einen äußerst interessanten ingenieurstechnischen Aspekt zutage. Wie die obengenannte Formel zeigt, wird der theoretische Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses nur durch die Temperaturunterschiede des Wärmereservoirs bestimmt und weder der Aufbau des Motors, noch Luft, Dampf oder sonstige abgeleitete Stoffe spielen eine Rolle. Anders ausgedrückt, wird der Carnot-Prozess ausschließlich durch natürliche Ursachen bestimmt und nicht dadurch, wie ein Motor aufgebaut ist.

Interessanterweise fällt auf, dass die Carnot-Wärmekraftmaschine die Hauptkomponente innerhalb der komplexen Motorstruktur im Hinblick auf die Wärmeübertragung sehr präzise identifiziert und die Wärmekraftmaschine auf abstrakte Weise betrachtet. Es wurde nichts vergessen und alle notwendigen Teile sind vorhanden. Es handelt sich gewissermaßen um eine absolute Form der Abstraktion.

TIPPS

Im Jahre 1824 veröffentlichte Carnot einen technischen Aufsatz mit dem Titel „Betrachtungen über die bewegende Kraft des Feuers“, in dem er den Carnot-Prozess beschrieb. Sein Ziel war es, Dampfmaschinen aus technischer Sicht zu verbessern.

Damals waren Dampfmaschinen weit verbreitet und wurden ständig verbessert – bis hin zu Dampfschiffen, die den Atlantik bereits fünf Jahre vor Carnots Aufsatz erfolgreich überquert hatten. Kaum jemand beschäftigte sich allerdings mit den wissenschaftlichen Grundlagen der Dampfmaschine. Daher wurden Verbesserungen lediglich anhand von Erfahrungen und „Vermutungen“ über die Mechanik vorgenommen. Carnot entschied sich, das Verhältnis zwischen der Wärmekraftmaschine und den natürlichen Ursachen zu untersuchen und nicht das, was durch Struktur, Mechanismen oder Arbeitsobjekten der Maschine verursacht wurde.

Die Bedeutung von Carnots Beitrag wurde nicht sofort erkannt. Hinzu kam, dass Carnot sich tragischerweise bei der Untersuchung der Cholera damit infizierte und im jungen Alter von 36 Jahren verstarb. Carnots Forschungsergebnisse und Schriften wurden nach seinem Tod fast alle zerstört – so wie es damals üblich war, wenn jemand an der Cholera gestorben war.

Nach Carnots Tod wurden seine von einem seiner Kommilitonen, Clapeyron, ergänzt. Dies führte zu einer verbreiteten Anerkennung von Carnots Ideen und trug dazu bei, dass Carnot als Vorreiter in den aufkommenden physikalischen Gebieten Thermodynamik und statistische Mechanik angesehen wurde.

TIPPS

William Thompson, der Mann, der den theoretischen Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses mithilfe einer Formel veranschaulichte, definierte die absolute Temperatur durch die Ableitung des theoretischen Wirkungsgrades des Carnot-Prozesses.

Ein Fahrzeug mit vier Rädern von Gottlieb Daimler aus dem Jahr 1886.

Der Benzinmotor des Daimler-Fahrzeugs mit vier Rädern: 462 ccm Hubraum, 680 U/min und 1,1 PS.

Das Motorteil des zuvor erwähnten Fahrzeugs mit drei Rädern von Karl Benz. Während der Motor von Daimler den Zylinder vertikal platzierte, war er hier horizontal eingebaut. 984 ccm Hubraum, 400 U/min und 0,96 PS.

3-4 Theoretischer Wirkungsgrad von Automotoren

▶ Untersuchung der theoretischen Wirkungsgrade des Otto-Kreisprozesses und des Diesel-Kreisprozesses

Otto-Kreisprozess

Wir wissen jetzt, was es mit einer idealen Wärmekraftmaschine auf sich hat, und wollen uns mit einem standardmäßigen Automotor befassen. Die heutigen Benzinmotoren basieren auf dem Viertaktmotor oder Otto-Kreisprozess, den Nikolaus Otto erfunden hat. Die vier Phasen des Otto-Kreisprozesses sind die (1) adiabatische Kompression, die (2) isochore Wärmezufuhr, die (3) adiabatische Ausdehnung und die (4) isochore Wärmeabfuhr. Die isochore Wärmezufuhr und isochore Wärmeabfuhr beziehen sich auf die Erhitzung und Abkühlung des Arbeitsmediums innerhalb des Zylinders, ohne dass dabei das Volumen des Zylinders geändert wird.

Wie schon beim Carnot-Prozess lässt sich auch beim Otto-Kreisprozess die Erreichung des maximalen Wirkungsgrades mithilfe eines Luftmotors mit heißen und kalten Wärmereservoirs und der sehr langsamen Bewegung der Kolben darstellen. Beim Otto-Kreisprozess lassen sich Unterschiede in der Temperatur während der isochoren Phasen (2) und (4) jedoch nicht vermeiden. Da der Otto-Kreisprozess keine isotherme Zustandsänderung beinhaltet, kann es zu keiner Wärmeübertragung vom heißen Wärmereservoir zur Luft oder von der Luft zum kalten Wärmereservoir kommen, ohne dass ein Temperaturunterschied auftritt, der zu einer Energie verschwendenden Wärmeübertragung führt. Diese Wärmeübertragung lässt den Otto-Kreisprozess im Vergleich zum Carnot-Prozess relativ ineffizient erscheinen.

Der theoretische Wärmewirkungsgrad des Otto-Kreisprozesses wird mathematisch wie folgt dargestellt:

$$\text{Theoretischer Wirkungsgrad des Otto-Kreisprozesses} = 1 - \frac{1}{\text{Kompression}^{\text{Verhältnis der spezifischen Wärme} - 1}}$$

Wie aus der Formel ersichtlich wird, unterscheidet sich der theoretische Wirkungsgrad des Otto-Kreisprozesses von dem des Carnot-Prozesses. Er wird durch die Motormechanik und die Eigenschaften des Arbeitsmediums in Bezug auf die Kompression und das Verhältnis der spezifischen Wärme bestimmt. Es gibt allerdings keine Einschränkungen, welche Mechanik für die Kompression oder welches Arbeitsmedium zu verwenden ist. Auch wenn der Motor viele Variablen und komplexe Mechanismen aufweist, bestimmen letztlich das Verdichtungsverhältnis und das Verhältnis der spezifischen Wärme den theoretischen Wirkungsgrad des Motors.

Schaubild 3-4-1 Phasen des Otto-Kreisprozesses

(1) Adiabatische Kompression
(2) Isochore Wärmezufuhr
(3) Adiabatische Ausdehnung
(4) Isochore Wärmeabfuhr
Heißes Wärmereservoir
Kaltes Wärmereservoir

Schaubild 3-4-2 Änderung des Luftdrucks und des Volumens im Otto-Kreisprozess

Luftmenge
Luftdruck
(1) Adiabatische Kompression
(2) Isochore Wärmezufuhr
(3) Adiabatische Ausdehnung
(4) Isochore Wärmeabfuhr

Beispiel für den Otto-Kreisprozess. TwinPower Turbo V8-Benzinmotor der Marke BMW.

TIPPS Der thermodynamische Kreisprozess des Atkinson-Zyklus, der häufig in Hybridautos zum Einsatz kommt, ist mit dem Otto-Kreisprozess identisch. Beachten Sie dazu die „Tipps" unter 3-7.

Theoretischer Wirkungsgrad des Diesel-Kreisprozesses

Der Diesel-Kreisprozess ist der von Rudolf Diesel erfundene thermodynamische Kreisprozess des Dieselmotors. Die vier Phasen des Diesel-Kreisprozesses sind die (1) adiabatische Kompression, die (2) isobare Wärmezufuhr, die (3) adiabatische Ausdehnung und die (4) isochore Wärmeabfuhr. Die isobare Wärmezufuhr bezieht sich auf die Erhitzung des Arbeitsmediums innerhalb des Zylinders, ohne dass sich dabei der Luftdruck verändert.

Der theoretische Wärmewirkungsgrad kann aus der nebenstehenden Formel abgeleitet werden.

Schaubild 3-4-3 Phasen des Diesel-Kreisprozesses

(1) Adiabatische Kompression
(2) Isobare Wärmezufuhr
(3) Adiabatische Ausdehnung
(4) Isochore Wärmeabfuhr
Heißes Wärmereservoir
Kaltes Wärmereservoir

Schaubild 3-4-4 Änderung des Luftdrucks und des Volumens im Otto-Kreisprozess

Luftdruck
(2) Isobare Wärmezufuhr
A
B
(3) Adiabatische Ausdehnung
(4) Isochore Wärmeabfuhr
(1) Adiabatische Kompression
Luftmenge

$$\text{Einspritzverhältnis des Kraftstoffs} = \frac{\text{Menge B}}{\text{Menge A}}$$

$$\text{Theoretischer Wirkungsgrad des Diesel-Kreisprozesses} = 1 - \frac{1}{\text{Kompression}^{\text{Verhältnis der spezifischen Wärme} - 1}} \cdot \frac{\text{Einspritzverhältnis des Kraftstoffs}^{\text{Verhältnis der spez. Wärme}} - 1}{\text{Verhältnis der spezifischen Wärme}\left(\text{Einspritzverhältnis des Kraftstoffs} - 1\right)}$$

Der Prozess wird nur durch drei Größen bestimmt: Verdichtungsverhältnis, Verhältnis der spezifischen Wärme und Kraftstoff-Einspritzverhältnis. Um den Wirkungsgrad des Diesel-Kreisprozesses zu maximieren, muss der Kolben erneut sehr langsam bewegt werden. In den Phasen (2) und (4) ist eine Wärmeübertragung jedoch unvermeidbar. Aus diesem Grund ist die Wärmeübertragung im Vergleich zu der des Carnot-Prozesses relativ ineffizient.

Beispiel für den Diesel-Kreisprozess. 2,2-Liter-Dieselmotor der Marke Mazda.

Keiner der drei Kreisprozesse – Carnot-Prozess, Otto-Kreisprozess und Diesel-Kreisprozess – erzielt den theoretischen Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine. In der Realität wird durch die für den maximalen Wirkungsgrad erforderliche langsame Bewegung des Kolbens kein Nutzwert erzeugt. Zudem können die Temperaturen des Kolbens und des Zylinders nicht vollständig isoliert werden, was zu Energie verschwendender Wärmeübertragung durch Temperaturunterschiede führt. Zudem kann die Reibung zwischen dem Kolben und dem Zylinder nicht verhindert werden. Durch die nähere Erläuterung des theoretischen Wirkungsgrades wird jedoch das Verständnis für die Funktionsweise einer jeden Wärmekraftmaschine erhöht und Ingenieuren ein äußerst nützliches Grundprinzip an die Hand gegeben.

3-5 Reversible Zustandsänderung und irreversible Zustandsänderung

▶ Die natürliche Zustandsänderung hat eine Richtung

Im Folgenden wollen wir uns basierend auf den Grundlagen, die in den letzten Abschnitten behandelt wurden, mit dem unvermeidbaren Energieverlust von Motoren befassen. Bevor wir jedoch ins Detail gehen, gilt es, ein sehr wichtiges Naturgesetz zu erklären.

Die Natur strebt von der Ordnung zum Chaos

Betrachten wir erneut die Gasmoleküle innerhalb eines Behälters. Dieses Mal verwenden wir dafür jedoch einen Behälter mit heißem Gas und einen weiteren mit kaltem Gas gefüllten versiegelten Behälter. Werden die beiden Behälter in Kontakt miteinander gebracht, wird die Wärme des heißen Behälters auf den kalten Behälter übertragen. Wird dieser Zustand beibehalten, erreichen beide Behälter kurz darauf eine mittlere Temperatur, wodurch es zu keiner weiteren Wärmeübertragung kommt. Dies führt zu einem Gleichgewichtszustand.

Von einer mikroskopischen Perspektive aus betrachtet, enthält der Behälter mit dem heißen Gas zunächst eine relativ gesehen höhere Anzahl an sich schnell bewegenden Molekülen, wohingegen der kalte Behälter eine relativ gesehen geringere Anzahl an sich schnell bewegenden Molekülen aufweist. Wenn die beiden Behälter in Kontakt miteinander gebracht werden, wird die kinetische Energie der Moleküle innerhalb des heißen Behälters auf den kalten Behälter übertragen, wodurch sich die molekulare kinetische Energie innerhalb des kalten Behälters erhöht. Sobald jedes Molekül in beiden Behältern die mittlere kinetische Energie (Temperatur) erreicht hat, wird keine weitere kinetische Energie (Wärmeenergie) zwischen den Behältern übertragen.

Schaubild 3-5-1 **Kontakt zwischen zwei Behältern mit unterschiedlichen Temperaturen**

Hohe Temperatur

Niedrige Temperatur

Höhere Anzahl sich schnell bewegender Moleküle

Moleküle bewegen sich relativ langsam

Adiabatische Wand

Temperaturen der beiden Behälter gleichen sich mit der Zeit an

Molekularbewegung wird identisch

Keine Zustandsänderungen vom „Chaos" zur „Ordnung"

Dasselbe Beispiel lässt sich auch aus einer anderen Perspektive betrachten. In einem Behälter befinden sich Moleküle mit hoher kinetischer Energie und im anderen Moleküle mit einer geringeren kinetischen Energie. Dadurch ist es möglich, den Unterschied im Hinblick auf die Molekularbewegung innerhalb des heißen und des kalten Behälters auszumachen. Man könnte sagen, dass eine erkennbare Information innerhalb der Behälter vorliegt. Sobald die beiden Behälter jedoch den Gleichgewichtszustand erreicht haben, liegen die sie unterscheidenden charakteristischen Informationen nicht länger vor. Die Behälter befinden sich nun in einem Zustand des „Chaos".

In der Natur ist der Übergang vom Zustand der „Ordnung" zu einem des „Chaos" im Grunde normal. Die umgekehrte Umwandlung vom „Chaos" hin zur „Ordnung" kommt in der Natur hingegen nicht vor. Als sich der heiße und kalte Behälter zum Beispiel in Kontakt miteinander befanden, kühlte sich der heiße Behälter ab, während sich der kalte Behälter erwärmte, was ein natürlicher Vorgang ist. Aus Erfahrung wissen wir jedoch, dass, wenn zwei Behälter mit unterschiedlichen Temperaturen in Kontakt gebracht werden, sich der heißere Behälter nicht erhitzen und sich der kältere Behälter nicht abkühlen wird. Dem Menschen ist es außerdem nicht möglich, ganz gleich, was er auch tut, gegen die Natur zu handeln und die beiden sich im Gleichgewichtszustand befindlichen Behälter wieder zu ihren „exakten" ursprünglichen Temperaturen zurückkehren zu lassen, wie beim Zurückspulen eines Videos. Wenn der ursprüngliche Zustand nicht wiederhergestellt werden kann, indem man die Zustandsänderung rückgängig macht, spricht man von einer irreversiblen Zustandsänderung. Wenn die Zustandsänderung rückgängig gemacht und der ursprüngliche Zustand wiederhergestellt werden kann, spricht man von einer reversiblen Zustandsänderung.

Schaubild 3-5-2 Die natürliche Richtung der Zustandsänderung in der Natur

Schaubild 3-5-3 Die Wärmeübertragung von einer niedrigen zu einer hohen Temperatur kommt in der Natur nicht vor. (Um genau zu sein, kann dieses Phänomen auf natürliche Weise auftreten, aber die Wahrscheinlichkeit dafür liegt nahe null und es ist zudem etwas, das der Mensch nicht beobachten kann.) Wenn die Wärmeübertragung von einer niedrigen zu einer hohen Temperatur künstlich erzeugt wird, bleiben stets Spuren der Übertragung zurück. Die perfekte Umkehrung zur Wiederherstellung der ursprünglichen hohen und niedrigen Temperaturen ist daher nicht möglich.

3-6 Umkehrung der Wärmekraftmaschine

▶ Unterschiede zwischen reversiblen und irreversiblen Kreisprozessen

Wir haben den theoretischen Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses, des Otto-Kreisprozesses und des Diesel-Kreisprozesses erklärt, also warum können Motoren einen solchen theoretischen Wirkungsgrad nicht erreichen? Warum treten in einem Motor Energieverluste auf? Die Antwort darauf verbirgt sich in der Tatsache, dass der theoretische Wirkungsgrad des thermodynamischen Kreisprozesses nur durch die schrittweise und langsame Bewegung des Kolbens erreicht werden kann.

Der reversible Ablauf des Carnot-Prozesses

Befassen wir uns noch einmal mit dem Carnot-Prozess. Bezeichnen wir den in der Reihenfolge (1) → (2) → (3) → (4) ablaufenden Carnot-Prozess als einen „progressiven Kreisprozess“ und den umgekehrten Ablauf (4) → (3) → (2) → (1) als einen „umgekehrten Kreisprozess“. Nehmen wir anschließend an, dass durch den progressiven Kreisprozess des Carnot-Prozesses eine gewisse Wärmemenge vom heißen zum kalten Wärmereservoir übertragen wird und die aus diesem Prozess abgeleitete Arbeit irgendwo gespeichert wird. Wird diese gespeicherte Arbeit anschließend dazu verwendet, um einen umgekehrten Kreisprozess des Carnot-Prozesses durchzuführen, wird die durch den progressiven Kreisprozess an das kalte Wärmereservoir übertragene Wärme wieder in der exakt selben Menge an das heiße Wärmereservoir abgegeben. Zu diesem Zeitpunkt wird die gespeicherte Arbeit durch den umgekehrten Kreisprozess aufgebraucht sein, wodurch nichts zurückbleibt. Anders ausgedrückt kann die aus dem progressiven Kreisprozess des Carnot-Prozesses abgeleitete Arbeit gespeichert werden und wenn diese gespeicherte Arbeit für den umgekehrten Kreisprozess verwendet wird, wird der gesamte Kreisprozess „wieder in den identischen ursprünglichen Zustand zurückversetzt“. Dies ist möglich, da beim Carnot-Prozess keine Objekte mit Temperaturunterschieden in Kontakt miteinander kommen, wodurch unnötige Wärmebewegungen vermieden werden. Mit anderen Worten handelt es sich bei allen Prozessen des Carnot-Prozesses um reversible Zustandsänderungen, ein umgekehrter Kreisprozess ist also möglich.

Schaubild 3-6-1 Umgekehrter Carnot-Prozess

(1) Progressiver Kreisprozess

Heißes Wärmereservoir
Kaltes Wärmereservoir
Übertragene Wärmemenge
Speicherung der Arbeit

(2) Umgekehrter Kreisprozess

Heißes Wärmereservoir
Kaltes Wärmereservoir
Die gesamte Wärme wird in den Ausgangszustand zurückversetzt
Die gesamte gespeicherte Arbeit wird zur Bewegung des Motors verwendet

Schaubild 3-6-2 Reversible Eigenschaft des Carnot-Prozesses

Alle Phasen des Carnot-Prozesses sind reversibel, weshalb ein umgekehrter Kreisprozess möglich ist.

Luftmenge
(1) Isotherme Ausdehnung
(2) Adiabatische Ausdehnung
(3) Isotherme Kompression
(4) Adiabatische Kompression
Luftdruck

Der umgekehrte Kreisprozess von Automotoren ist irreversibel

Betrachten wir nun den Otto-Kreisprozess und den Diesel-Kreisprozess. Gehen wir wie schon in den vorherigen Fällen davon aus, dass die Arbeit aus dem progressiven Kreisprozess gespeichert wird, und wenden wir diese gespeicherte Arbeit auf den umgekehrten Kreisprozess an. Selbst wenn wir die gespeicherte Arbeit für den umgekehrten Kreisprozess aufbrauchen, kann nicht die gesamte Wärme vom kalten Wärmereservoir zum heißen Wärmereservoir übertragen werden und nur ein Teil der Wärme wird in den ursprünglichen Zustand zurückversetzt.

Der Grund dafür ist, dass beim Otto-Kreisprozess und beim Diesel-Kreisprozess ein Temperaturunterschied für die Durchführung der (2) isochoren Wärmezufuhr und (4) isochoren Wärmeabfuhr sowie der (2) isobaren Wärmezufuhr und (4) isobaren Wärmeabfuhr erforderlich ist. Diese Prozesse erzeugen keine Arbeit und verursachen eine verschwendete Wärmeübertragung zwischen der hohen und niedrigen Temperatur. Im Vergleich zum Carnot-Prozess wird die aus einem progressiven Kreisprozess abgeleitete Arbeitsmenge daher durch dieselbe Menge an verschwendeter Wärmeübertragung reduziert. Zudem widerspricht der umgekehrte Verlauf den Gesetzen der Natur, indem in einem Verfahren mit Temperaturunterschied Wärmeenergie von der niedrigen Temperatur zur hohen Temperatur übertragen wird – wodurch wieder zusätzliche Arbeit erforderlich wird.

Dies weist im Grunde auf einen sehr wichtigen Aspekt hin. Wenn eine Wärmekraftmaschine keinen reversiblen umgekehrten Kreisprozess durchführen kann, ist das ein Beweis dafür, dass während der Phase, in der die Arbeitsleistung im Kreisprozess erzeugt wird, eine verschwendete Wärmeübertragung auftritt. Wir werden zu einem späteren Zeitpunkt darauf eingehen.

Schaubild 3-6-3 Umgekehrter Carnot-Prozess

(1) Progressiver Kreisprozess

(2) Umgekehrter Kreisprozess

TIPPS Wenn der Carnot-Prozess reversibel ist, was bleibt dann nach der Durchführung eines progressiven Kreisprozesses und eines anschließenden umgekehrten Kreisprozesses übrig? Carnot verstand, dass sein Carnot-Prozess, der keine Spuren hinterlässt, der ideale Motor ist. Gäbe es einen Motor, der effizienter als der Carnot-Prozess ist, müsste dieser wie ein Perpetuum mobile funktionieren, aber man geht davon aus, dass ein Perpetuum mobile nicht existiert und diese Möglichkeit daher fraglich ist.

37 Energieverlust in Motoren

▶ Der Energieverlust ist durch die irreversible Zustandsänderung bedingt

Bei der Erklärung des theoretischen Wirkungsgrads einer Wärmekraftmaschine haben wir wiederholt erwähnt, dass „der Kolben schrittweise und mit langsamer Geschwindigkeit bewegt werden muss“. Das ist notwendig, um irreversible Zustandsänderungen jeglicher Art zu vermeiden. Wir wollen die Art des Energieverlusts, der aufgrund einer irreversiblen Zustandsänderung auftritt, jetzt näher beleuchten.

Energieverlust in Motoren

Wie bereits gezeigt, wird im Carnot-Prozess die Wärme nicht durch Temperaturunterschiede übertragen. Ein reversibler umgekehrter Kreisprozess ist also möglich. Sowohl der Otto-Kreisprozess als auch der Diesel-Kreisprozess hängen aber von irreversiblen Prozessen ab, die Temperaturunterschiede für die Wärmeübertragung innerhalb des Prozesses nutzen. Ein reversibler umgekehrter Kreisprozess ist in diesem Fall also nicht möglich.

Bisher haben wir uns auf das Konzept der irreversiblen Zustandsveränderung konzentriert, bei dem die Wärmeübertragung durch die Nutzung von Temperaturunterschieden erfolgt. Tritt beim Ablauf des Wärmekraftmaschinen-Kreisprozesses jedoch das Phänomen einer irreversiblen Zustandsänderung auf, kann die Wärmeübertragung nicht für die Arbeit genutzt werden und wird stattdessen zu einem Faktor, der die Menge der möglichen Arbeit reduziert.

Wenn der echte Motor läuft, wird Wärme durch die chemische Zustandsänderung des Benzins innerhalb des Zylinders erzeugt. Die dadurch erzeugte Energie wird für die Bewegung des Kolbens genutzt, um so die Arbeitsleistung zu erbringen. Zu diesem Zeitpunkt erzeugt die Wärme Temperaturunterschiede, die eine unnötige Verschwendung der Wärmeübertragung verursachen. Die Reibung zwischen dem Zylinder und dem Kolben sorgt für Lärm und Turbulenzen und die chemische Zustandsänderung des Benzins ist ebenfalls irreversibel. Da es sich bei diesen Phänomenen um irreversible Zustandsänderungen handelt, können sie, wenn sie auftreten, natürlich nicht in ihren exakt selben ursprünglichen Zustand zurückversetzt werden, wie es z. B. bei einem zurückgespulten Video der Fall ist. Anders ausgedrückt, ist eine Energie verschwendende Wärmeübertragung aufgetreten.

Die Motorenentwicklung ist von einem ständigen Kampf um Effizienz geprägt. Auf dem Bild ist ein 3,8-Liter-V-Typ-Motor mit 6 Zylindern [VR38] der Marke Nissan zu sehen.

Mechanischer Energieverlust

Bisher haben wir uns auf Wärmekraftmaschinen konzentriert. Mechanische Energieverluste treten jedoch einzig und allein aufgrund von irreversiblen Zustandsänderungen auf. Allerdings kommen irreversible Zustandsänderungen bei einer effizienten Maschine nicht so häufig vor. Um eine effiziente Maschine zu bauen, ist es daher sehr wichtig, zu verstehen, worum es sich bei einer irreversiblen Zustandsänderung handelt, und ihr Auftreten so gut es geht zu verhindern.

Schaubild 3-7-1

Wenn der Kolben schnell bewegt wird, geht im Motor eine gewisse Menge irreversibler Energie verloren.

TIPPS Der Atkinson-Zyklus verwendet den gleichen thermodynamischen Kreisprozess wie der Otto-Kreisprozess und die Arbeitsleistung wird durch eine Verlängerung des Ausdehnungsprozesses erhöht. Der Atkinson-Zyklus wurde mit dem Ziel erdacht, einen Motor zu entwickeln, der kaum irreversible Zustandsänderungen verursacht. Er ist ein thermodynamischer Kreisprozess, der eine Verlängerung der adiabatischen Zustandsänderung in (1) und (3) sowie eine Verkürzung der isobaren Wärmeabfuhr des irreversiblen Zustandsänderungsprozesses in (4) durchläuft. Man beachte, dass die für adiabatische Ausdehnung bei hoher Temperatur und die adiabatische Kompression bei niedriger Temperatur stehenden Linien sich niemals überschneiden, weshalb ein als Leiter dienender isochorer Prozess erforderlich ist.
Im Hinblick auf die Optimierung des Wirkungsgrades von Motoren oder sonstigen Maschinen kann eine ähnliche Aussage getroffen werden, nämlich die, dass das Hauptaugenmerk auf der „Sicherstellung der Verhinderung von irreversiblen Zustandsänderungen" liegt.

Schaubild 3-7-2 **Atkinson-Zyklus**

Der Atkinson-Zyklus ist ein thermodynamischer Kreisprozess, bei dem der adiabatische Prozess verlängert und die isobare Wärmeabfuhr verkürzt wird.

Das Hybridmodell des Honda Accord ist mit einem 2-Liter-Atkinson-Zyklus-DOHC-i-VTEC-Motor ausgestattet.

Auch die kompliziertesten Phänomene sind den einfachsten Regeln unterworfen.

4 1 Bernoullis Prinzip

▶ Die Beziehung zwischen der Strömungsgeschwindigkeit eines Fluids und dessen Druck

Welchen Einfluss hat die das Automobil umgebende Luft auf dessen Leistung? Um diese Frage zu beantworten, müssen wir zunächst die Theorie der Aerodynamik verstehen. In diesem Abschnitt werden wir auf die Grundlagen der Aerodynamik eingehen.

Die Molekularbewegung bei Vorhandensein einer Strömung (Fluss)

Im vorherigen Abschnitt haben wir erklärt, dass der in einem Gleichgewichtszustand gemessene Druck ungeachtet der Richtung stets gleich ist. Von einer makroskopischen Perspektive aus betrachtet erkennt man, dass die unzähligen, sich unregelmäßig umherbewegenden Moleküle in allen Richtungen gleichmäßig aufeinandertreffen. Aus energetischer Sicht könnte man es so ausdrücken, dass sich die kinetische Energie der Moleküle gleichmäßig verteilt. Dies nennt man auch „Gleichverteilungssatz der Energie“ (nachfolgend „Gleichverteilung“).

Tritt in der Bewegung der Moleküle jedoch eine Strömung auf, wird die Gleichverteilung außer Kraft gesetzt. In diesem Fall bewegt sich mehr kinetische Energie in Richtung der Strömung, während es weniger kinetische Energie in Richtungen gibt, die nicht der Strömung entsprechen. Wenn der Druck in der Strömung gemessen wird, ist der Druck in der Strömungsrichtung am höchsten und senkrecht zur Strömungsrichtung am geringsten.

Dabei ist zu beachten, dass die Summe der kinetischen Energie sich vor und nach einer Zustandsänderung in der Strömungsrichtung nicht ändern wird. Geht eine Strömung zum Beispiel aus einem Gleichgewichtszustand hervor, so entspricht die Summe der kinetischen Energie nach dem Auftreten der Strömung immer noch der Summe der Energie im Gleichgewichtszustand. Wenn sich die Strömungsgeschwindigkeit ändert, ändert sich somit zwar die Verteilung der kinetischen Energie, doch die Summe der gesamten kinetischen Energie bleibt gleich.

Schaubild 4-1-1 Bewegung der Moleküle. Tritt in der Bewegung der Moleküle eine Strömung auf, werden der höchste Druck in der Strömungsrichtung und der niedrigste Druck an einem Punkt senkrecht zur Strömungsrichtung gemessen.

Schaubild 4-1-2 Verteilung der molekularen kinetischen Energie

Die Summe der kinetischen Energie ändert sich auch bei einer Änderung der Strömungsrichtung nicht.

Schaubild 4-1-3 Beispiel für Bernoullis Prinzip

Wenn der Strömungsbereich wie bei Punkt (1) erweitert wird, verringert sich die Strömungsgeschwindigkeit, aber der Druck steigt an.
Wenn der Strömungsbereich wie bei Punkt (2) verkleinert wird, erhöht sich die Strömungsgeschwindigkeit, aber der Druck sinkt.

Bernoullis Prinzip

Bernoullis Prinzip definiert die Beziehung zwischen der Strömungsgeschwindigkeit und dem Druck, wenn es aufgrund einer Änderung der Strömung zu einem Energieverlust kommt. Aus mathematischer Sicht kann Bernoullis Prinzip wie unten aufgeführt ausgedrückt werden.

P steht hierbei für den Druck, ρ für die Fluiddichte und V für die Strömungsgeschwindigkeit. Bernoulli erkannte die Beziehung zwischen der Strömungsgeschwindigkeit und dem Druck durch das „vis viva"-Konzept (lateinisch für „lebendige Kraft"), das dem Konzept der Energie sehr ähnlich ist. Es wird jedoch häufig angenommen, dass er kein umfassendes Verständnis für die Beziehung zwischen dem Druck und der Geschwindigkeit hatte. Die Person, die Bernoullis Prinzip eine vollständige und korrekte mathematische Bedeutung gab, war sein enger Freund Leonhard Euler.

$$P_0=P_1+\frac{1}{2}\rho V_1^2=P_2+\frac{1}{2}\rho V_2^2$$

Auftrieb erzeugender Mechanismus

In diesem Abschnitt werden wir den Mechanismus erklären, wie ein Tragflächenprofil nach Bernoullis Prinzip Auftrieb erzeugt.

Schaubild 4-1-4 zeigt die Strömungslinie eines Tragflächenprofils. Eine Strömungslinie ist eine Linie, die auf der Tangente des Geschwindigkeitsvektors liegt. Es handelt sich um die Strömungslinie bzw. Stromlinie. Die Definition der Strömungslinie besagt, dass eine Strömung eine Strömungslinie nicht kreuzt; ein Bereich zwischen derselben Strömungslinie hat also dasselbe Strömungsvolumen, und zwar an jeder Stelle des Stroms. Ein Ort, an dem Strömung existiert, wird auch als Strömungsfeld bezeichnet wird.

Wenn wir uns das Strömungsfeld in Schaubild 4-1-4 ansehen, erkennen wir, dass die Strömungslinie vor dem Tragflächenprofil einen gleichmäßigen Abstand hat. Aber der Abstand der Strömungslinie über dem Tragflächenprofil ist verengt. Da die Strömung die Strömungslinie nicht kreuzen wird, können wir annehmen, dass der Strömungsbereich über einem Tragflächenprofil begrenzt ist. Da sich das Volumen der Strömung in einem Strömungsbereich zwischen denselben Strömungslinien nicht verändern wird, muss die Geschwindigkeit der Strömung über dem Tragflächenprofil, wo der Strömungspfad begrenzt ist, zunehmen. Deswegen sollte nach Bernoullis Prinzip der Druck auf einem Tragflächenprofil proportional zum Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit abnehmen. Wenn sich die Strömung unter dem Tragflächenprofil im Gegensatz dazu erhöht, wird die Strömungsgeschwindigkeit verringert und der Drück wird erhöht. Dieser Druckunterschied zwischen der Ober- und der Unterseite des Tragflächenprofils erzeugt Auftrieb.

Schaubild 4-1-4 Auftrieb erzeugender Mechanismus am Beispiel eines Tragflächenprofils

Der Strömungsbereich verengt sich auf der Oberseite der Tragfläche. Da sich das Strömungsvolumen nicht ändert, steigt die Strömungsgeschwindigkeit, wodurch der Druck über der Tragfläche abfällt.

4-2 Gesetz der Fluiddynamik

▶ Die Bedeutung der Gleichung der Fluiddynamik

Euler-Gleichung – ohne Berücksichtigung der Viskosität

Euler, der auch eine Formel für Bernoullis Prinzip aufgestellt hat, leitete als Erster die Fluidgleichung der Bewegung ab. Im Hinblick auf die Weiterentwicklung der Hydrodynamik war diese Entdeckung sehr viel wichtiger als Bernoullis Prinzip. Die von Euler abgeleitete Bewegungsgleichung wird Euler-Gleichung genannt und ist nachfolgend aufgeführt.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla P$$

Die linke Seite der Gleichung wird der advektive Term oder Konvektionsterm genannt und steht für den Advektionseffekt, oder anders gesagt den durch die Bewegung des Fluids verursachten Effekt. Die rechte Seite wird hingegen der Druckterm genannt und steht für den Druckgradienten (Druckgefälle). Kurz gesagt lautet Eulers Aussage: „Die Strömung des Fluids richtet sich nach dem Druckgradienten".

Ein gutes Beispiel für den Druckgradienten sind die Druckverteilungsdiagramme in der Meteorologie. Wenn in Japan Winter herrscht, strömt kalte und trockene Luft vom eurasischen Kontinent in das Land, da der Druckgradient in der Umgebung Japans im Westen hoch und im Osten niedrig ist. Wenn die Drucklinien eng beieinander liegen, bedeutet dies, dass der Druckgradient ein starkes Gefälle aufweist, was zu starken Winden in den entsprechenden Gebieten führt. Liegen die Drucklinien weit auseinander und weisen einen schwachen Druckgradienten auf, werden für diese Gebiete schwache Winde vorhergesagt. Dieses äußerst intuitive Verständnis für die Strömung ist es, was in der Euler-Gleichung erfolgreich veranschaulicht wird.

Schaubild 4-2-1 **Druckgradient**

Höhe der Neigung

Druck

Strömung des Fluids entspricht dem Druckgradienten (Druckgefälle).

Die Beschleunigung der Strömung erhöht sich bei einem steilen Verlauf des Druckgradienten (Druckgefälle).

Die Beschleunigung der Strömung verringert sich, wenn der Druckgradient (Druckgefälle) gegen die Strömung verläuft (entgegengesetzter Druckgradient).

TIPPS Die Bewegungsgleichung für ein Fluid, dessen Viskosität gleich null ist, wird Euler-Gleichung genannt. Die oben behandelte Gleichung gilt für ein nicht-komprimiertes Fluid und lässt Veränderungen der Dichte unberücksichtigt. Euler hat darüber hinaus auch eine Bewegungsgleichung für ein komprimiertes Fluid aufgestellt.

Navier-Stokes-Gleichung – unter Berücksichtigung der Viskosität

Die Euler-Gleichung stellte eine mathematische Formel für die Auswirkungen der Strömung des Fluids und ihre Beziehung zum Druck zur Verfügung. Sie veranschaulichte jedoch nicht die Auswirkungen der Viskosität, in der Realität eine wichtige Eigenschaft von Fluiden. Die Bewegungsgleichung, welche die Auswirkungen der Viskosität berücksichtigte, wurde im 19. Jahrhundert von Claude-Louis Navier und George Gabriel Stokes hergeleitet. Die Navier-Stokes-Gleichung ist nachfolgend aufgeführt.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla P + \nabla \cdot \tau$$

Wie schon bei der Euler-Gleichung stellt die linke Seite der Gleichung den advektiven Term (Konvektionsterm) dar und steht für den Advektionseffekt des Fluids. Die erste Variable auf der rechten Seite der Gleichung ist der Druckterm (oben) und steht für den Druckgradienten. Bei der neu hinzugefügten zweiten Variable handelt es sich um die Viskosität oder den Diffusionsterm. Er steht für die Eigenschaft der Viskosität. Kurz zusammengefasst besagt die Navier-Stokes-Gleichung: „Die Strömung des Fluids richtet sich nach dem Druckgradienten, aber die Viskosität hat ebenfalls eine Auswirkung auf das Moment des Fluids". Die bereits erwähnte Navier-Stokes-Gleichung gilt für ein nicht-komprimiertes Fluid und Veränderungen der Dichte bleiben unberücksichtigt.

TIPPS Sowohl für die Euler-Gleichung als auch für die Navier-Stokes-Gleichung muss noch eine allgemeinere Lösung gefunden werden. Die Gleichungen können nur auf sehr spezifische und spezielle Strömungen (Fluss) angewandt werden. Für die Anwendung dieser Gleichungen auf allgemeine Strömungsfelder muss ein Computer verwendet werden, um die Gleichungen numerisch zu lösen. Die Navier-Stokes-Gleichung ist nicht nur ein wichtiges Forschungsthema auf dem Gebiet der Hydrodynamik, sondern auch eine wichtige mathematische Modellfrage, die für die Erforschung nichtlinearer partieller Differenzialgleichungen verwendet wird. Im Jahr 2000 schrieb das Clay Mathematics Institute in den Vereinigten Staaten einen Preis (Millennium-Preis) in Höhe von einer Million Dollar für denjenigen aus, der irgendeines der sieben ungelösten Probleme der Mathematik (Millennium-Probleme) lösen kann. Eines der sieben Probleme war es, die Existenz einer Lösung für die Navier-Stokes-Gleichung nachzuweisen und so das Konzept der Glätte zu beweisen.

Computergenerierte Lösung der Navier-Stokes-Gleichung

4-3 Ebene der Diskontinuität und Wirbelfaden

▶ Vermeidungsstrategie der Fluid-Bewegungsgleichung

Obwohl sowohl die Euler-Gleichung als auch die Navier-Stokes-Gleichung die Bewegung eines Fluids auf mathematisch korrekte Weise ausdrücken, können sie aufgrund der mit ihnen einhergehenden extremen mathematischen Schwierigkeiten nicht praktisch auf die tatsächliche Strömung eines Fluids angewandt werden. Da eine Lösung in weiter Ferne zu liegen schien, wurde ein analytischer Ansatz ohne die Verwendung dieser bekannten Gleichungen verfolgt.

D'Alembertsches Paradoxon

D'Alembert, der ein Bekannter von Bernoulli und Euler war, suchte nach der theoretischen Lösung für den Luftwiderstand (eine Kraft, die in der entgegengesetzten Richtung parallel zur Strömungsgeschwindigkeit auftritt), der durch einen kreisförmigen Zylinder verursacht wird, der in einer zweidimensionalen gleichförmigen Strömung platziert wird. Die von ihm hergeleitete Lösung betrug jedoch immer null, obwohl der Luftwiderstand in der Realität niemals gleich null sein konnte. Seine Formel wies keine Rechenfehler auf und das Ergebnis null wurde von jedem errechnet, der es versuchte. In den nächsten 160 Jahren wurde die Gleichung zu einem der größten Probleme in der Hydrodynamik und wurde bald unter dem Namen „d'Alembertsches Paradoxon“ bekannt.

Mit dem heutigen Wissen können wir verstehen, dass keine von d'Alemberts Berechnungen falsch war und dass die von ihm hergeleitete Lösung durchaus logisch war, da die Gleichung die Viskosität des Fluids nicht berücksichtigte. Bei beständigen und gleichmäßigen Strömungsbedingungen, unter denen die Viskosität kein Faktor ist, würde die Strömung vor und hinter dem Zylinder symmetrisch werden. Dadurch wären auch der vordere und der hintere Druck symmetrisch, wodurch sie sich gegenseitig aufheben würden, was einen Luftwiderstand von null zur Folge haben würde.

Damals musste die Navier-Stokes-Gleichung erst noch gefunden werden, weshalb die Anwendung der Viskosität nicht eindeutig war. Das d'Alembertsche Paradoxon wurde erst im Jahre 1904 von Ludwig Prandtl durch die Einführung des Konzeptes der Grenzschicht gelöst.

Schaubild 4-3-1 D'Alembertsches Paradoxon

Da die Strömung symmetrisch zum Zentrum des Zylinders verläuft, wird der Luftwiderstand gleich 0.

TIPPS Die Konzepte der Wirbelfäden und diskontinuierlichen Oberflächen erstreckten sich auf mehrere Felder der Auftriebskraft: Zirkulationstheorie, Grenzschichttheorie und Tragflügeltheorie, die allesamt in den folgenden Abschnitten behandelt werden. Der Wirbel in der Hydrodynamik unterscheidet sich von dem allgemeinen Bild einer Spirale. In der Hydrodynamik wird ein Wirbel als eine Art der Bewegung definiert, und zwar als eine starre, beschränkte Rotation.

Konzept des Wirbelfadens und der Ebene der Diskontinuität

Die erste Person, die auf dem Weg zum mathematischen Verständnis der Bewegung eines Fluids eine Vorreiterrolle einnahm, war der deutsche Physiker Hermann von Helmholtz. Er erweiterte das Konzept des Wirbels, um ein neues Verständnis für die Strömung zu erschaffen.

Stellen Sie sich ein Fluidelement vor, das wie im Schaubild 4-3-2 von links nach rechts strömt. Wenn die Oberfläche des Fluidelements Scherkräften ausgesetzt wird (eine Kraft, durch die eine Scherbelastung auf ein Material wirkt, siehe 2-1), kommt es zu Unterschieden in der Geschwindigkeit des Fluidelements, das sich über die Oberfläche bewegt. Infolgedessen beginnt das Fluidelement zu rotieren, wodurch ein Wirbel erschaffen wird. Wenn man einen solchen Wirbel im Querschnitt betrachten würde, würde er wie konzeptionelle Fäden von verschwindend geringer Größe aussehen. Man nennt diese Fäden Wirbelfäden. Die Schicht, die durch die Ansammlung dieser Wirbelfäden erschaffen wird, bezeichnet man als Wirbelschicht.

Durch die Umsetzung des Konzeptes der Wirbelfäden, wie in Schaubild 4-3-3 abgebildet, können diskontinuierliche Geschwindigkeitsebenen, die auftreten, wenn Strömungen unterschiedlicher Geschwindigkeit ineinander übergehen (eine Ebene, auf der sich die Kontinuität der Werte drastisch ändert), und Grenzschichten, in denen sich die Strömungsgeschwindigkeit um Körper herum drastisch verändert, mathematisch beschrieben werden. Eine solche Strömung kann als eine durch die rotierende Bewegung der feinen Fluidelemente gebildete Strömung angesehen werden, wobei derselbe mathematische Ansatz verwendet wird, der bereits für einen Wirbel existiert.

Als Helmholtz die Konzepte der Wirbelfäden und Wirbelschichten einführte, keimte plötzlich Hoffnung auf, dass das d‘Alembertsche Paradoxon gelöst werden könne. Kurz nachdem Helmholtz das Konzept der Oberflächendiskontinuität vorgestellt hatte, machten sich Kirchhoff und Rayleigh daran, die Kraft des Luftwiderstands auf einer ebenen Fläche zu berechnen. Laut d‘Alembertschem Paradoxon ist der Luftwiderstand auf einer ebenen Fläche gleich null. Wenn jedoch angenommen werden könnte, dass hinter den vorderen und hinteren Kanten der Fläche eine diskontinuierliche Oberfläche existierte, kann angenommen werden, dass die gegenüberliegende Oberfläche eine geringere Fluid-Viskosität aufweist, wodurch das d‘Alembertsche Paradoxon aufgehoben würde. Leider schlugen die Bemühungen von Kirchhoff und Rayleigh fehl, da ihre Schätzungen des Drucks auf der angenommenen gegenüberliegenden Seite der ebenen Fläche zu hoch waren, aber der eingeschlagene Weg wies zumindest in die richtige Richtung.

Schaubild 4-3-2 Konzept des Wirbelfadens und der Wirbelschicht. Um das Konzept der Wirbelfäden besser zu veranschaulichen, werden die Wirbelfäden in einer endlichen Größe gezeichnet. Die Querschnittsfläche eines Wirbelfadens ist jedoch infinitesimal.

Schaubild 4-3-3 Kraftunterschied von hohen und geringen Geschwindigkeiten auf einer diskontinuierlichen Oberfläche

Schaubild 4-3-4 Anwendung des Wirbelfaden-Konzeptes (Wirbelschicht) auf die Strömungsgeschwindigkeit der diskontinuierlichen Oberfläche.

Schaubild 4-3-5 Konzeptionelles Schaubild eines Strömungsfeldes, das eine ebene Fläche (Oberfläche) umgibt. Wenn die Existenz der diskontinuierlichen Flächen der vorderen und hinteren Kanten einer ebenen Fläche angenommen werden könnte, würde das d‘Alembertsche Paradoxon keine Rolle spielen.

4 4 Satz von Kutta-Joukowski

▶ Zirkulationstheorie des Auftriebs

Kirchhoff und Rayleigh stellten die Hypothese auf, dass sich die diskontinuierliche Oberfläche um den Teil des spitzen Winkels herum bildet. Nichtsdestoweniger kann sich eine solche diskontinuierliche Oberfläche überall auf der Oberfläche eines Körpers bilden. Außerdem kann das Argument angeführt werden, dass die Oberfläche eines Körpers mit Wirbelschichten bedeckt ist. In Wahrheit hängt die Theorie des Auftriebs eng mit der Zirkulationstheorie des Auftriebs zusammen.

Satz von Kutta-Joukowski

Die Strömungsgeschwindigkeit verändert sich durch die Viskosität auf der Oberfläche eines Körpers drastisch. Dies führt zur Bildung von Wirbelfäden, die wiederum zu Wirbelschichten werden, welche die Oberfläche des besagten Körpers umhüllen. Die Stärke der Wirbelschichten auf der Körperoberfläche wird „Zirkulation" genannt. Darauf aufbauend kann die Strömung rund um den Umfang des Materials in zwei künstliche Strömungen unterteilt werden: in die gleichförmige Strömung (Strom) und in die Zirkulationsströmung (aus einer anderen Perspektive betrachtet, handelt es sich bei der Zirkulation um den durch die Integration der Strömungsgeschwindigkeit entlang der zufällig gewählten horizontalen Kurve abgeleiteten Betrag).

Befassen wir uns nun, basierend auf der im vorherigen Abschnitt besprochenen Existenz einer gleichförmigen Strömung und Zirkulationsströmung, mit einer Strömung, bei der beide Typen gleichzeitig auftreten und sich gegenseitig überlappen. In diesem Beispiel fließt der obere Teil der Zirkulationsströmung in dieselbe Richtung wie die gleichförmige Strömung, wodurch sich die Strömungsgeschwindigkeit auf der Oberseite erhöht. Die Zirkulationsströmung auf der Unterseite fließt hingegen in die entgegengesetzte Richtung der gleichförmigen Strömung, bei einer Überlappung verringert sich die Strömungsgeschwindigkeit also. Infolgedessen und gemäß Bernoullis Prinzip verringert sich der Druck auf der Oberseite, während sich der Druck auf der Unterseite der Zirkulationsströmung erhöht, wodurch ein aufwärtsgerichteter Auftrieb erzeugt wird (Schaubild 4-4-1).

Dieses Modell ähnelt im Grunde dem Strömungsfeld, das ein Tragflächenprofil umgibt. Das Tragflächenprofil wird so gewählt, dass es dem Anstieg der Strömungsgeschwindigkeit auf der Oberseite entspricht, wodurch sich der Druck verringert. Eine Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit auf der Unterseite bewirkt hingegen eine Erhöhung des Drucks. Das das Tragflächenprofil umgebende Strömungsfeld kann als eine Überlappung der gleichförmigen Strömung und der Zirkulationsströmung betrachtet werden und wenn eine Zirkulation vorhanden ist, kann der Auftrieb mit folgender Gleichung berechnet werden (Schaubild 4-4-2).

Auftrieb = Strömungsdichte x Geschwindigkeit der gleichförmigen Strömung x Wirbelzirkulation ($L=\rho V\Gamma$)

Diese Theorie wurde jeweils unabhängig von Martin Wilhelm Kutta und Nikolai Joukowski eingeführt und wird daher als Satz von Kutta-Joukowski bezeichnet. Der Satz besagt, dass, ungeachtet der Form und Größe eines Körpers, bei Vorhandensein einer Zirkulation der Auftrieb des Körpers bestimmt werden kann.

Schaubild 4-4-1 **Strömungsfeld mit überlappender gleichförmiger Strömung und Zirkulationsströmung**

Schaubild 4-4-2 **Das ein Tragflächenprofil umgebende Strömungsfeld kann als eine Kombination aus gleichförmiger Strömung und Zirkulationsströmung bezeichnet werden.**

Die Kutta-Bedingung

Durch den Satz von Kutta-Joukowski haben wir herausgefunden, dass der Auftrieb eines Körpers berechnet werden kann, wenn die den Körper umgebende Zirkulation bekannt ist. Um diese Theorie jedoch auf ein Tragflächenprofil anzuwenden, muss ein spezieller Faktor berücksichtigt werden. Die Fluid-Gleichung basiert im Allgemeinen auf dem Konzept, dass die Strömung glatt ist und dass eine besondere Betrachtungsweise erforderlich ist, wenn der Körper scharfkantig ist oder eine diskontinuierliche Strömung vorliegt.

Wenn ein Tragflächenprofil als Beispiel herangezogen wird, ist die Rückseite des Tragflächenprofils scharfkantig. Der Satz von Kutta-Joukowski kann daher nicht auf ein Tragflächenprofil angewandt werden, es sei denn, die auf der Ober- und Unterseite des Tragflächenprofils verlaufende Strömung kann an der hinteren Kante glatt abströmen. Diese erforderliche Bedingung, dass die obere und untere Strömung wieder glatt abströmen muss, wird die Kutta-Bedingung genannt. Durch die Anwendung der Kutta-Bedingung kann die Zirkulation bestimmt und der Auftrieb anschließend mathematisch berechnet werden.

Wird bei einer Tragfläche ein der Strömung entgegengesetzter Anströmwinkel gewählt, ist eine umso größere Zirkulation erforderlich, je größer der Winkel ist, um die Kutta-Bedingung zu erfüllen. Je größer daher der Anströmwinkel ist, desto größer ist auch die Zirkulation, wodurch auf natürliche Weise ein umso größerer erzeugt wird.

Schaubild 4-4-3 Die Kutta-Bedingung und Zirkulation

Kutta-Bedingung: Die an der Ober- und Unterseite der Tragfläche verlaufende Strömung strömt an der Rückseite glatt und mit derselben Geschwindigkeit ab.

Je größer der Anströmwinkel ist, desto größer muss die Zirkulation sein, um die Kutta-Bedingung zu erfüllen.

4 5 Die Grenzschichttheorie von Prandtl

▶ Reibung wirkt sich nur auf die nahe Umgebung der Oberfläche eines Körpers aus

Auch wenn die Berechnungen des Luftwiderstands von Kirchhoff und Rayleigh nicht erfolgreich waren, befanden sie sich auf dem richtigen Weg. Im Folgenden behandeln wir die Grenzschichttheorie von Prandtl, durch die das d'Alembertsche Paradoxon endlich gelöst werden konnte.

Die Grenzschichttheorie von Prandtl

Für die korrekte Berechnung des Luftwiderstands muss man den Druck kennen und die Handhabung der Reibungskraft verstehen. Um die Reibungskraft zu verstehen, muss man die Strömungsbedingung auf der Oberfläche des Körpers genau kennen. Um die Reibungskraft korrekt berechnen zu können, muss die Frage beantwortet werden, ob ein Fluid vollständig auf der Oberfläche eines Körpers haften kann, wenn die Fluid-Viskosität gleich null ist, oder ob das Fluid bei jeder Geschwindigkeit über die Oberfläche gleitet.

Ludwig Prandtl befasste sich mit diesem schwierigen Thema, indem er als Erster das Konzept der Grenzschicht anwandte. Er fand heraus, dass die Strömungsgeschwindigkeit auf der Oberfläche eines Körpers durch die Auswirkungen der Viskosität gleich null ist und dass die Reibungseffekte sich nur auf die Nähe der der Oberfläche des Körpers auswirken. Abgesehen davon wird die Strömung nicht durch die Viskosität beeinflusst und könnte als ein reibungsfreies Fluid definiert werden. Der Bereich der Oberflächennähe des Körpers, der durch die Viskosität beeinflusst wird, wird gegenwärtig als Grenzschicht bezeichnet.

Im Jahr 1904 veröffentlichte Prandtl eine kurze achtseitige Abhandlung mit dem Titel „Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung", in der er zum ersten Mal das Konzept der Grenzschicht vorstellte. Er wandte die Navier-Stokes-Gleichung nur auf eine bestimmte Strömung in der Grenzschicht an. Dies führte zur Entwicklung der Grenzschichtgleichung, eine vereinfachte Ableitung der Navier-Stokes-Gleichung. Diese Gleichung war sehr viel leichter zu handhaben als die vollständige Navier-Stokes-Gleichung und ermöglichte eine logischere und genauere Berechnung des Luftwiderstands.

Die Grenzschichttheorie trug auch dazu bei, den Ablösungspunkt der Strömung besser abzuschätzen. Mithilfe dieser Erkenntnisse konnte das d'Alembertsche Paradoxon endlich unter Verwendung von Prandtls Grenzschichttheorie gelöst werden. Die 1904 von Prandtl veröffentlichte Abhandlung erweiterte die Hydromechanik und wird heute als eines der wichtigsten Werke in der Geschichte dieser Disziplin betrachtet.

Schaubild 4-5-1 Grenzschicht-Geschwindigkeitsverteilung einer Tragflächenprofiloberfläche. Die Reichweite der Grenzschicht wird außerhalb der Oberflächennähe des Körpers als weniger als 99 % der Fluid-Viskosität definiert.

Schaubild 4-5-2 Ablösungspunkt auf einem Tragflächenprofil und Geschwindigkeitsverteilung in der Grenzschicht.

Schaubild 4-5-3 **Ein an Land fahrendes Fahrzeug wird in aerodynamischer Hinsicht stark durch den Boden beeinflusst. In einer natürlichen Außenumgebung würde eine Grenzschicht in der Umgebung der Oberflächennähe unterhalb des Fahrzeugs nicht existieren. Bei einem Versuch im Windkanal bilden sich jedoch entlang der Kanalwände Grenzschichten. Die Strömungsgeschwindigkeit ist in der Grenzschicht gering und infolgedessen blockiert sie im Grunde den Strömungsbereich unterhalb des Fahrzeugs. Dadurch wird im Kanal im Vergleich zur Außenumgebung ein komplett anderes Strömungsfeld erzeugt. Bei Rennwagen, die speziell darauf ausgelegt sind, einen Anpressdruck zwischen der Unterseite des Autos und dem Boden zu erzeugen, wurden solche Unterschiede im Strömungsfeld zum echten Problem. Als Lösung wurde ein Laufband im Windkanal eingeführt, um die Straßenoberfläche in einer Außenumgebung zu simulieren. Das Laufband hilft nicht nur dabei, die Drehbewegung der Reifen zu erzeugen, sondern verhindert im Windkanal auch die Bildung einer Grenzschicht unter dem Fahrzeug.**

Luftströmung
Luftwiderstand
Laufband
Auftrieb (Front)
Auftrieb (Heck)
Grenzschichtabsaugung

TIPPS Ursprünglich griff Prandtl auf zwei Formulierungen zurück, um sein Konzept zu beschreiben. Die eine lautete „Grenzschicht“ und die andere „Übergangsschicht“, wobei er die zweite Formulierung häufiger verwendete. Prandtls Studenten hingegen verwendeten die Formulierung „Grenzschicht“ häufiger und diese Bezeichnung ist es auch, die noch heute benutzt wird.

TIPPS Prandtls Beitrag zur Hydromechanik kann gar nicht hoch genug bewertet werden. Neben der Grenzschichttheorie führte Prandtl die Tragflügeltheorie, die Mischungsweghypothese und die Theorie zu Stoßwellen in einer Überschallströmung ein, die allesamt zu Grundprinzipien der modernen Hydromechanik wurden. Zudem brachte seine Lehre hochqualifizierte Absolventen wie Blasius, Karman und Munk hervor, die alle zu weithin anerkannten Wissenschaftlern auf dem Gebiet der Hydromechanik wurden.

4-6 Prandtls Tragflügeltheorie

▶ Bildung von Flügelspitzenwirbeln an endlichen Tragflächen

Dank Kutta und Joukowski war die Zirkulationstheorie des Auftriebs geboren und die genaue Auftriebsberechnung einer zweidimensionalen Strömung wurde möglich. Tragflächen und ihre Strömungen und Zirkulationen sind jedoch dreidimensional, eine zweidimensionale Strömung kann also in der vorliegenden Form nicht angewandt werden. Es musste eine neue Theorie über die Auftriebskraft in einem dreidimensionalen Strömungsfeld entwickelt werden.

Strömung um eine begrenzte Flügelspannweite herum

Wie bereits erklärt, handelt es sich bei einem Tragflächenprofil um eine Tragfläche mit einer unendlichen Flügelspannweite. Eine Tragfläche mit einer unendlichen Flügelspannweite wird, ungeachtet der Position auf der Tragfläche, stets eine gleich große Zirkulation aufweisen und auch der Auftrieb wäre konstant. Von daher kann der Satz von Kutta-Joukowski direkt auf eine Tragfläche mit unendlicher Flügelspannweite angewandt werden.

Eine tatsächliche Tragfläche verfügt jedoch über eine begrenzte Flügelspannweite. An der Kante der Tragfläche wird die Strömung versuchen, von der Unterseite der Tragfläche, wo der Druck hoch ist, zur Oberseite, wo der Druck geringer ist, zu gelangen. Aus diesem Grund unterscheidet sich die Druckverteilung auf der Oberfläche einer Tragfläche mit begrenzter Flügelspanne im Vergleich zu der eines Modells mit unendlicher Flügelspannweite und der Auftrieb nimmt zur Flügelspitze hin ab. Die Strömung zirkuliert von der Hochdruckseite zur Niederdruckseite und verursacht beim Abströmen einen vertikalen Wirbel. Der an der Flügelspitze generierte Wirbel wird Flügelspitzenwirbel genannt.

Schaubild 4-6-1 Strömung um eine Tragfläche mit begrenzter Flügelspannweite

Schaubild 4-6-2 Zirkulation und Auftrieb von Tragflächen mit einer unendlichen und einer begrenzten Flügelspannweite

Schaubild 4-6-3 Flügelspitzenwirbel

Prandtls Tragflügeltheorie

Ein Engländer namens Frederick Lanchester entwarf unter Verwendung des Wirbelfaden-Konzeptes von Helmholtz ein Strömungsmodell für eine Tragfläche mit begrenzter Flügelspannweite. Er ging von der Annahme aus, dass sich durch Wirbelfäden eine Zirkulation um die Tragfläche herum bildet und dass sich die Wirbelfäden hin zur abwärtsgerichteten Strömung an der Flügelspitze neigen, wodurch eine neue Zirkulation erzeugt wird. Er glaubte, dass die Strömung um eine Tragfläche mit begrenzter Flügelspannweite aus einer „gleichförmigen, aufwärtsgerichteten Strömung", „einer parallel zur Flügelspitze angeordneten Wirbelschicht" und einer „von der Flügelspitze aus abwärtsgerichteten Wirbelfadenströmung" besteht. Durch die Kombination dieser Strömungselemente glaubte Lanchester den Auftrieb einer Tragfläche mit begrenzter Flügelspannweite herleiten zu können. Er konnte seine Theorie jedoch nicht präzise mathematisch ausdrücken und sie wurde in den damaligen akademischen Kreisen nicht anerkannt.

Die Theorie für eine Tragfläche mit begrenzter Flügelspannweite wurde von Prandtl vervollständigt, der auch schon die Grenzschichttheorie aufgestellt hatte. Prandtls Theorie zum Auftrieb einer Tragfläche mit begrenzter Flügelspannweite war dem Modell von Lanchester sehr ähnlich, aber er war in der Lage, seine Theorie mit einer mathematischen Beweisführung zu stützen.

Prandtls Modell basierte auf Wirbelfäden von unendlich geringer Größe, die sich in einer unendlichen Anzahl bündeln und bei Kontakt mit der Tragflächenoberfläche abwärts neigen. Diese Wirbelfäden nennt man Traglinien.

Prandtls Tragflügeltheorie ermöglichte die Berechnung der Auftriebskraft und des Drehmoments, die von einer Tragfläche mit einer begrenzten Flügelspannweite erzeugt werden können. Außerdem wurde die Existenz eines induzierten Luftwiderstands bestätigt, der durch den vom Flügelspitzenwirbel erzeugten Abwind erzeugt wird. Auf diese Weise konnte in der Theorie bewiesen werden, dass der induzierte Luftwiderstand kleiner wurde, wenn die Spannweite (Flügelstreckung) einer Tragfläche vergrößert wurde.

TIPPS Flügelspitzenwirbel, wie in Schaubild 4-6-3 zu sehen, treten auf, wenn durch den hohen Druck unterhalb der Tragfläche eine aufwärtsgerichtete Strömung hin zur Oberseite der Tragfläche, wo der Druck geringer ist, erzeugt wird. Für die Erzeugung des Flügelspitzenwirbels muss eine konstante Energiequelle zur Verfügung stehen. Wird diese Energie durch einen Motor bereitgestellt, kommt es zu Verschwendung aufgrund von Treibstoffverbrauch. In der Realität wird das Druckfeld der Tragfläche durch den Abwind in Verbindung mit dem Flügelspitzenwirbel beeinflusst, wodurch ein druckinduzierter Luftwiderstand entsteht. Da es sich hierbei um Luftwiderstand handelt, der durch die vom Auftrieb induzierte Strömung verursacht wird, bezeichnet man ihn als „induzierten Luftwiderstand". Prandtl wies darauf hin, dass der Flügelspitzenwirbel den Auftrieb verringert. Dies liegt daran, dass der durch den Wirbel erzeugte Abwind die Wirkung des Anströmwinkels verringert. In diesem Zusammenhang sollte auch erwähnt werden, dass der Flügelspitzenwirbel zuerst von Lanchester entdeckt wurde (Schaubild 4-6-6).

Schaubild 4-6-4 Konzeptionelles Schaubild der Tragflügeltheorie

Schaubild 4-6-5 Lanchesters Abbildung des die Tragfläche umgebenden Wirbels

Schaubild 4-6-6 Vom Chassis eines Autos erzeugter Längswirbel

5 1 Die Welt der CFD

▶ CFD – eine Welt der Diskretisierung

Mit der Einführung in die Theorie der Aerodynamik im letzten Abschnitt sollte deutlich geworden sein, dass man für ein komplettes Verständnis des Konzepts des Strömungsfeldes Fluid-Gleichungen wie die Navier-Stokes-Gleichung lösen muss. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurden in diesem Bereich große Fortschritte gemacht, da man mithilfe von Computern Fluid-Gleichungen numerisch lösen konnte.

Dies ist das Feld der „numerischen Strömungssimulation“ (oder „Computational Fluid Dynamics“ und daher zumeist als CFD bezeichnet). CFD ist schon seit einiger Zeit ein essenzielles Werkzeug für die Automobilentwicklung. Es ist aber nicht sehr bekannt in der Öffentlichkeit. Um die grundlegende Funktionsweise der CFD zu verstehen, gehen wir kurz auf die theoretischen Konzepte ein, die ihr zugrunde liegen.

Näherung

Die reale Welt ist analog. Man kann sie als gleichmäßiges Kontinuum ansehen, sodass jeder Punkt in einem unendlichen Raum-Zeit-Kontinuum irgendeine Art von physischen Daten hervorbringt. Selbst in der theoretischen Fluiddynamik wird das Fluid im Grunde genommen als ein gleichmäßiges, sich ständig änderndes Kontinuum betrachtet. Andererseits sind Computer digital. Sie können also nur mit fragmentierten und/oder diskontinuierlichen Werten umgehen und begrenzte Informationen speichern. Deshalb unterteilt die CFD das gleichmäßige Kontinuum von Raum und Zeit und behandelt es auf diskontinuierliche Weise. Es gilt aber zu beachten, dass es das Ziel der CFD ist, das gleichmäßige Kontinuum der realen Welt soweit wie möglich darzustellen. Dazu müssen Informationen, die nicht in Computern vorhanden sind, modelliert und ergänzt werden.

Wie ergänzt man also diese fehlenden Informationen? Das geschieht, indem die Informationen im Computer einfach mit einer geraden Linie verbunden werden und die fehlenden Daten als etwas behandelt werden, das sich auf dieser geraden Linie verändert. Oder wir ergänzen, indem wir ein Modell mit einer gekrümmten Linie nutzen, das Änderungen als Kurve darstellt, dort wo Informationen fehlen. Dieser Vorgang der Vereinfachung von Informationen ohne die ursprünglichen Eigenschaften zu verlieren, nennt sich „Näherung“. Wird mithilfe der Näherung ein Wert ermittelt, der dem ursprünglichen nahekommt, wird dieser „Näherungswert“ genannt. In der CFD wird oben genannte Annäherungsmethode ein „Verfahren“ genannt.

Schaubild 5-1-1 Der Unterschied zwischen der realen Welt und der Welt der CFD

Schaubild 5-1-2 Ergänzen von Daten, die in Computern fehlen

Der Äquivalenzsatz von Lax

Da Computer Informationen über sämtliche Zeit und sämtlichen Raum der realen Welt nicht enthalten können, stellen die von CFD berechneten Ergebnisse einen Näherungswert dar. Ist der Unterschied zum Effektivwert klein genug, gibt es vom praktischen Standpunkt aus gesehen, keine essenziellen Probleme. Wenn beispielsweise die durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeit in einem Strömungsfeld 30 m/s beträgt, ergibt es nicht wirklich Sinn, über einen Zahlenwert von 0,000001 nachzudenken. Eine Person, die eine Strömung zwischen 30 m/s und 30,000001 m/s analysiert, wird beide Werte als praktisch identisch betrachten. Deshalb können solche minimalen Zahlenwerte ignoriert werden. Gleiches gilt, wenn eine Simulation ähnliche minimale Unterschiede in den Resultaten ergibt. Solange diese minimal genug sind, spielen sie keine Rolle. Um es technisch auszudrücken: Das Rechenergebnis aus einer Simulation ist akzeptabel, solange das Ergebnis sich dem Effektivwert „annähert“.

Nun kommen wir zu einem wichtigen Theorem, dem „Äquivalenzsatz von Lax“, der von Peter Lax entwickelt wurde. Dieses Theorem besagt, dass „nur ein Verfahren, das Annäherung benutzt, stabil ist“. Mit anderen Worten: Das Verhältnis von [Stabilität + Übereinstimmung = Konvergenz] ist der Äquivalenzsatz von Lax. Siehe auch Schaubild 5-1-4 für die Bedeutung von „Übereinstimmung“, „Stabilität“ und „Konvergenz“.

Schaubild 5-1-3

Äquivalenzsatz von Lax

Stabilität + Übereinstimmung

⬆⬇

die Berechnung konvergiert

TIPPS Der Äquivalenzsatz von Lax besagt, dass die linearen und die skalaren Zeitentwicklungsgleichungen das Kriterium von Stabilität und Übereinstimmung für die Konvergenz in der Differenzengleichung erfüllen. Mit anderen Worten: Wenn die Konvergenz vorliegt und die Gitterinkremente klein sind, nähert sich die Differenzlösung ihrer ursprünglichen Differenzialgleichung an.

Schaubild 5-1-4 **Übereinstimmung und Stabilität. Der „Effektivwert“, auf man sich hier bezieht, ist die Lösung, die man erhält, wenn man partielle Differenzialgleichungen für das Fluid analytisch löst.**

Übereinstimmung

Je kleiner die Inkremente, desto mehr nähert man sich dem Effektivwert.

Was ist Übereinstimmung?

Die Situation, in der wir uns dem Effektivwert umso mehr nähern, je kleiner die Inkremente von Zeit und Raum sind. Die meisten Verfahren erfüllen dieses Kriterium.

Physikalische Größe

Raum

Physikalische Größe

Raum

Effektivwert

Computerinformation und Ergänzung

Stabilität

Die Durchführung von Berechnungen in Richtung der Zeit erhöht den Fehlergrad nicht.

Was ist Stabilität? Es ist eine Situation, in der die Durchführung von Berechnungen in Richtung der Zeit den Fehlergrad nicht erhöht – ungeachtet der Ursachen.

Physikalische Größe

Raum

Physikalische Größe

Raum

Effektivwert

Computerinformation und Ergänzung

5-2 Finite-Volumen-Methode

▶ Die am häufigsten verwendete Fluid-Simulationstechnik

Es wurden viele Fluid-Simulationstechniken entwickelt. Wir sehen uns die am weitesten verbreitete Technik an, die „Finite-Volumen-Methode".

Konzept der Finite-Volumen-Methode

Die Finite-Volumen-Methode richtet die Aufmerksamkeit auf das Gleichgewicht des Volumens, das in getrennte Raumelemente hinein- und wieder aus ihnen herausfließt. Stellen wir uns beispielsweise die Wassermenge vor, die in einen Behälter hineinfließt und wieder aus ihm herausfließt. Um zu berechnen, wie viel Wasser sich eine Sekunde später im Behälter befindet, kann folgende Gleichung benutzt werden:

Menge in einem Behälter nach 1 Sekunde = Originalmenge + Zufluss pro Sekunde - Abfluss pro Sekunde

Die Grundidee hinter der Finite-Volumen-Methode ähnelt dem Konzept der Technik der Vorhersage der zukünftigen Wassermenge durch Verwendung der aktuellen Wassermenge und der hinein- und herausfließenden Wassermenge. Die Technik zur Berechnung der Fluidmenge in einer Simulation kann auch auf physikalische Größen wie Druck und Strömungsrate angewandt werden.

TIPPS Die Näherung (Verfahren), die für die Differenzen-Methode und die Finite-Volumen-Methode verwendet wird, baut auf der Taylorreihe auf. Die Taylorreihe ist eine Technik, die eine glatte Funktion durch eine Reihenentwicklung darstellt. Obwohl die Taylorreihe hier nicht beschrieben wird, ist sie sehr wichtig für verschiedene mathematische Verfahren, einschließlich der CFD. Wir empfehlen allen Interessierten, sich näher mit der Taylorreihe zu befassen.

Schaubild 5-2-1 Konzept der Finite-Volumen-Methode

Um voraussehen zu können, wie viel Wasser im Behälter sein wird, muss lediglich das Verhältnis von hineinfließendem und abfließendem Wasser im Auge behalten werden. Das ist die Grundlage der Finite-Volumen-Methode. Man muss jedoch beachten, dass die hinein- und abfließende Menge nicht klar definiert werden kann und deshalb eine Schätzung vorgenommen werden muss. Somit wird die Genauigkeit der Simulation wesentlich durch die Genauigkeit der Schätzung beeinflusst.

Numerischer Fluss

Sehen wir uns das Konzept der Finite-Volumen-Methode durch CFD ein wenig näher an. Zunächst unterteilen wir den Raum, wie in Schaubild 5-2-2 zu sehen. Der unterteilte Raum wird als „Gitter" (oder Netz oder Raster) bezeichnet. Nun stellen wir uns ein Fluid vor, das durch das Gitter fließt.

Wir setzen zuerst voraus, dass wir die physikalische Größe kennen, die jedes Gitterelement zu einem bestimmten Zeitpunkt enthält. Das Konzept der Fluidsimulation mittels der Finite-Volumen-Methode besteht darin, mithilfe von Zufluss und Abfluss der physikalischen Größe pro Zeiteinheit, die in zukünftigen Elementen enthalten sein wird, eine Vorhersage zu treffen.

Wie wird also die Menge von Zufluss und Abfluss pro Zeiteinheit in jedem Element bestimmt? Die Antwort in der CFD lautet: Indem man einen akzeptablen Wert aus den Zufluss- und Abflussmengen, basierend auf der Verteilung der aktuellen physikalischen Größe, misst (nähert). Man kann noch wählen, wie die Menge bestimmt wird, doch Zufluss und Abfluss pro Zeiteinheit können nicht eindeutig definiert werden. Die Verwendung der menschlichen Wahl zur Bestimmung der physikalischen Größe von Zufluss und Abfluss pro Zeiteinheit nennt man „numerischer Fluss" und seine Genauigkeit hat großen Einfluss auf die Genauigkeit der Berechnungsergebnisse.

Schaubild 5-2-2 Numerischer Fluss in das Element hinein und aus ihm heraus.

Zukünftige physikalische Größe von Element j = Ursprüngliche physikalische Größe von Element j
+ Numerischer Fluss j-1/2 in Element j
− Numerischer Fluss j + ½ aus Element j

Schaubild 5-2-3 Strömungsfeld um den Heckflügel eines Rennwagens

5-3 Merkmale des Verfahrens

▶ Monotonie und höchste Präzision können nicht kompatibel sein.

Es gibt mehrere Wege zur Bestimmung des numerischen Flusses, und jemand, der CFD verwendet, muss das passende Verfahren festlegen. Natürlich kann man nicht einfach ein beliebiges Verfahren wählen. Die Genauigkeit des numerischen Flusses kann variieren, abhängig vom verwendeten Verfahren, und sie beeinflusst die Genauigkeit der Simulation. Wie der Äquivalenzsatz von Lax besagt, erhöht ein unpassendes Verfahren die Fehlertoleranz und sorgt für Abweichungen in den Berechnungen. Wir untersuchen nun kurz, wie unterschiedliche Verfahren die Ergebnisse beeinflussen können.

Das Verfahren der primären Näherung

Zur Vervollständigung der in einem Computer fehlenden Information ist der erste Schritt eine Annäherung mithilfe einer geraden Linie, um die Änderungen der physikalischen Größe darzustellen. Wird ein linearer Ausdruck zur Annäherung an die lineare Veränderung verwendet, wird die Genauigkeit dieses Verfahrens als primäre Genauigkeit bezeichnet. Das Verfahren der Näherung erster Ordnung hat den Vorteil, Monotonie aufrechterhalten zu können, aber den Nachteil einer Streuung der Lösung.

Schaubild 5-3-1 **Berechnungsbeispiel einer Wellenausbreitung und dem Verfahren der Näherung erster Ordnung. Die Lösung ist diffus, weil das Verfahren der Näherung erster Ordnung die Hochfrequenzwellen nicht auflösen kann.**

Das Verfahren der Genauigkeit höherer Ordnung

Es ist einfach, anzunehmen, man könnte ein präziseres Ergebnis erhalten, wenn man Informationen (physikalische Größe) aus mehr Gitterelementen erhält und eine Näherung einer gekrümmten Linie höherer Ordnung anstelle einer Näherung eines linearen Ausdrucks mit gerader Linie durchführt. Und die Lösung mithilfe eines Verfahrens mit Genauigkeit höherer Ordnung ist tatsächlich präziser als jene eines Standardverfahrens mit Genauigkeit erster Ordnung. Doch je höher die Ordnung, desto größer wird die physikalische Größe, die für die Berechnung aus vielen Gittern verwendet wird, was die rechnerische Komplexität erhöht. Es gibt auch noch andere Nachteile, zum Beispiel, dass manche Verfahren der Näherung höherer Ordnung eine Lösung zum Schwingen bringen und somit die Genauigkeit verringern.

Schaubild 5-3-2 **Ein Berechnungsbeispiel eines Verfahrens der Näherung zweiter Ordnung und Wellenausbreitung (Strömung). Die Wellenform ist unterbrochen, weil die Genauigkeitswelle höherer Ordnung sich von der Geschwindigkeit (Phase) der Wellenausbreitung der Frequenz unterscheidet.**

Godunov-Theorem

Für den größten Teil des Strömungsfelds kann man präzisere Berechnungsergebnisse erhalten, wenn ein Verfahren der Näherung höherer Ordnung benutzt wird. Das Verfahren der Näherung höherer Ordnung hat aber auch Nachteile. Wird ein Verfahren der Näherung höherer Ordnung in Bereichen verwendet, wo es plötzliche Strömungsänderungen gibt, wie etwa eine Strömung auf einer Oberfläche der Diskontinuität, wird die Lösung anfällig für Schwingungen, was zu unrealistischen Werten und mangelnder Stabilität führen kann. In dieser Art Strömungsfeld bietet das Verfahren der Näherung erster Ordnung, das Monotonie aufrechterhalten kann, bessere Ergebnisse.

Warum erstellen wir dann kein hochpräzises Verfahren, bei dem die Lösung nicht schwingt? Leider wurde mathematisch bewiesen, dass die beiden Bedingungen (das Verfahren mit hoher Genauigkeit und eine monotone Lösung) nicht kompatibel sein können. Das ist das „Godunov-Theorem". Laut Godunov-Theorem gibt es kein Verfahren, das gleichzeitig „hohe Genauigkeit" und eine „monotone Lösung" bieten kann. Und wie man es auch anstellt, es gibt keinen Weg, so ein ideales Verfahren der Näherung höchster Ordnung zu erstellen.

Schaubild 5-3-3 Laut dem Godunov-Theorem kann kein Verfahren der Näherung höherer Ordnung die Monotonie einer Lösung (das Zeichen des Gradienten ändert sich nicht) für die lineare Wellengleichung aufrechterhalten. Um das Problem zu lösen, wurden nicht-lineare Verfahren erstellt. Eines davon ist das TVD (nachfolgend beschrieben).

Schaubild 5-3-4 Die Genauigkeit für drastische Änderungen der Strömung, wie etwa eine Oberfläche der Diskontinuität

5-4 Kompatibilität der Näherungen der ersten Ordnung und höherer Ordnung

▶ Wie man die Näherung der ersten Ordnung und die Näherung höherer Ordnung kompatibel macht

Laut Godunov-Theorem kann ist ein Verfahren, das „hohe Genauigkeit" bietet und bei dem „die Lösung nicht schwingt", unmöglich. Ungeachtet der Herangehensweise gibt es keinen Weg, die Möglichkeit auszuschließen, dass die Lösung schwingen wird. Deshalb müssen wir über einen anderen Weg nachdenken, um gute Ergebnisse zu erzielen, ohne dass die Lösung schwingt.

TVD

Die Lösung mit Näherung erster Ordnung wird schnell diffus und die Genauigkeit ist nicht sehr hoch. Die Lösung schwingt aber nicht und sie kann Monotonie aufrechterhalten. Dagegen liefert eine Näherung höherer Ordnung zwar naturgemäß präzisere Daten als die Näherung erster Ordnung, doch wenn die abrupte Änderung der Strömung gelöst wird – wie etwa bei einer diskontinuierlichen Oberfläche – kann die Lösung schwingen und zu unrealistischen Werten und Inkonsistenzen führen. Es gibt also Vor- und Nachteile bei der Näherung erster Ordnung und der Näherung höherer Ordnung. Warum also nicht einfach – je nach Strömung – nur die jeweiligen Vorteile jeder Methode nutzen, um die besten Rechenergebnisse zu erhalten? Diese Idee führte zu einer Technik namens TVD (Total-Variation-Diminishing-Verfahren).

Das TVD ist eine Mischform aus Näherung erster Ordnung und Näherung höherer Ordnung. Beim TVD handelt es sich um eine Herangehensweise, die entwickelt wurde, um Änderungen in der Gesamtlösung zu verhindern. Sie kann Änderungen der Strömungsstärke bestimmen und der größte Teil der Strömung wird mithilfe der Näherung höherer Ordnung berechnet. In einer Situation, in der sich aber die Strömung drastisch verändert, wechselt sie zur Näherung erster Ordnung, sodass die Monotonie aufrechterhalten wird.

Schaubild 5-4-1 TVD

- Mischform aus Näherung erster Ordnung und Näherung höherer Ordnung
- Je nach Strömung wird entweder die Näherung erster Ordnung oder die Näherung höherer Ordnung verwendet.

	Vorteil	Nachteil
Näherung erster Ordnung	Monotonie	Streuung der Lösung
Näherung höherer Ordnung	Hohe Präzision	Schwingung der Lösung

⬇ Nur die Vorteile der jeweiligen Methode nutzen

TVD

TIPPS Neben dem TVD gibt es weitere Techniken zur Reduzierung von Schwingung, die auftritt, wenn das Verfahren der Näherung höherer Ordnung genutzt wird. Erwähnenswerte Methoden wären eine, die künstliche numerische Viskosität hinzufügt, und eine andere namens MUSCUL.

TIPPS Verfahren wie das TVD, die Genauigkeit höherer Ordnung in gleichmäßigen Strömungsbereichen beibehalten, aber gleichzeitig klare Angaben von diskontinuierlichen Bereichen erfassen, werden allgemein als hochauflösende Verfahren bezeichnet.

Schaubild 5-4-2 **Die erzielten Ergebnisse sind viel näher am Effektivwert, wenn das TVD verwendet wird**

Bewertung des TVD-Verfahrens

Schaubild 5-4-2 zeigt ein Ergebnis, das mithilfe von TVD berechnet und mit Ergebnissen aus dem Verfahren der Näherung höherer Ordnung und dem Verfahren der Näherung erster Ordnung verglichen wurde. Anders als das Verfahren der Näherung erster Ordnung schwankt das TVD nicht durch nicht-physikalische Effekte wie Überschwingung oder Unterschwingung. Bemerkenswert ist auch, dass die Streuung besser beibehalten wird als die des Verfahrens der Näherung erster Ordnung. Im Besonderen ist zu bemerken, dass das TVD dichtere Effektivwerte (exakte Lösung) als die anderen Verfahren hat.

Da man aber bei der Verwendung des TVD-Verfahrens die Änderung im Strömungsfeld bestimmen muss, dauert es entsprechend länger, die Ergebnisse zu berechnen.

TIPPS Das TVD ist effektiv beim Lösen einer Oberfläche der Diskontinuität – wie die einer Stoßwelle – und ist eine Technik, die bei Simulationen kompressibler Strömungen weit verbreitet ist.

5 5 Lösen von Turbulenz

▶ Verfahren zur Reduzierung rechnerischer Komplexität

Lösen von Wirbeln

Wenn sich ein Fahrzeug bewegt, bilden sich um es herum Turbulenzen. Turbulenz entsteht aus großen und kleinen Luftwirbeln. Um selbst den einfachsten Wirbel berechnen zu können, benötigt man mindestens neun Gitterelemente, wie in Schaubild 5-5-1 zu sehen ist. Zur direkten Berechnung aller Wirbel um ein Fahrzeug herum wäre eine enorme Anzahl von Elementen notwendig.

Wenn wir beispielsweise die Wirbel berechnen wollten, die die Turbulenz um ein Fahrzeug herum bilden, das 100 km/h fährt, würde die Anzahl der benötigten Elemente 1013 betragen. Mit anderen Worten: Es würden 10 Billionen Gitterelemente benötigt! Bei der Verwendung eines Supercomputers wäre das theoretisch möglich, aber in der realen Welt des Automobilbaus wird eine so umfangreiche Berechnung als nicht umsetzbar angesehen.

Schaubild 5-5-1 Zur Berechnung zweidimensionaler Wirbel werden mindestens neun Gitterelemente benötigt.

Schaubild 5-5-2 Der Zusammenhang zwischen Turbulenz und Luftwirbeln

Turbulenz setzt sich aus großen und kleinen Luftwirbeln zusammen.

Turbulenzmodell

In der Strömungslehre führte das Modellieren von Turbulenzcharakteristiken zu einem besseren Verständnis der wahren Natur der Turbulenz. Die Turbulenzbewegungen werden in der Navier-Stokes-Gleichung dargestellt, aber eine perfekte Lösung kann nicht erreicht werden. Daher wurden Anstrengungen unternommen, die entscheidenden Turbulenzcharakteristiken zu modellieren – und das mit einigem Erfolg. In der Praxis wurde durch die Einführung dieser vereinfachten Turbulenzmodelle (es wird nicht versucht, eine Lösung für alle kleinen und großen Wirbel zu finden) in die CFD die Anzahl der benötigten Berechnungen reduziert. Sehen wir uns die am häufigsten genutzten Turbulenzmodelle an: RANS und LES.

TIPPS Wird das Turbulenzmodell nicht benutzt und die Gleichung eines Fluid direkt gelöst, nennt man das DNS (Direct Numerical Simulation). Aber wie bereits erwähnt, muss der Raum fein unterteilt werden, um eine perfekte DNS durchzuführen. Zusätzlich zieht die Unterteilung des Raums eine Unterteilung der Zeit nach sich, was die rechnerische Komplexität enorm erhöht.

RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes)

RANS ist ein Turbulenzmodell, das die Strömungsrate der Turbulenz in einen Durchschnittswert umwandelt, der in die Streuungskomponente unterteilt wird. Die für RANS erforderliche rechnerische Komplexität ist relativ gering. Deshalb wird das Modell am häufigsten genutzt. Es gibt aber auch Nachteile wie etwa die Schwierigkeit, das Ablösen der Strömung exakt abzuschätzen.

Schaubild 5-5-3 **RANS**

Die Turbulenz ändert unregelmäßig ihre Strömungsgeschwindigkeit, kann aber über die durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeit und die Streuungskomponente ermittelt werden.

Strömungsgeschwindigkeit
Turbulenz-Strömungsgeschwindigkeit = durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeit + Streuungskomponente
Durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeit
Streuungs-komponente
Zeit

LES (Large Eddy Simulation)

Im Zusammenhang mit der Turbulenz stellen große Wirbel einen dominanten Einfluss bei der Messung der Turbulenz dar. Je kleiner der Wirbel, desto schwächer ist der Gesamteinfluss auf das Strömungsfeld. Wenn man die Berechnung des kleinen Wirbels vermeidet und einfach direkt den großen Wirbel berechnet, wird der kleine Wirbel in einem Verfahren namens LES modelliert. LES ist in der Lage, das Strömungsfeld mit einem viel höheren Präzisionsgrad zu berechnen als RANS. Es besitzt allerdings eine viel größere rechnerische Komplexität.

Schaubild 5-5-4

Direkte Lösung des großen Wirbels

A
Adiabatische Zustandsänderung 53
Äquivalenzsatz von Lax 79
Anströmwinkel 73
Atkinson-Zyklus 63
Auftrieb 67
B
Begrenzte Flügelspannweite 76
Bernoullis Prinzip 66
Bewegungsgleichung 20
Bode-Diagramm 32
Boltzmann-Konstante 51
C
Carnot-Prozess 52
CFD 78
Chaos 59
D
Diesel-Kreisprozess 57
Diskontinuierliche Oberfläche 71
Drehmoment 20
Dämpfungsgrad 28
D'Alembertsches Paradox 70
E
Eigenfrequenz 27
Einlenken 40
Energieerhaltungssatz 22
Energieverlust 62
Euler-Gleichung 68
F
Finite-Volumen-Methode 80
Flügelspannweite 76
Frequenzverhalten 32
G
Gefederte Masse 46
Geringe Dämpfung 28
Gierdämpfung 41
Gieren 39
Gleichgewichtszustand 50
Godunov-Theorem 83
Grenzschichttheorie von Prandtl 74
I
Irreversible Zustandsänderung 59
Isobare Wärmezufuhr 57
Isochore Wärmeabfuhr 56
Isochore Wärmezufuhr 56
Isotherme Zustandsänderung 52
K
Konvergenz 79
Kraft 20
Kritische Dämpfung 28
Kutta-Bedingung 73
L
Lenkbalance 38
LES 87
M
Monotonie 83
N
Navier-Stokes-Gleichung 69
Neutrales Lenkverhalten (NL) 38
Nicken 39
Numerischer Fluss 81
O
Ordnung 59
Otto-Kreisprozess 56
P
Phasendifferenz 30
Prandtls Tragflügeltheorie 76
R
RANS 87
Reaktion 30
Resonanz 26
Resonanzfrequenz 27
Reversible Zustandsänderung 59
S
Satz von Kutta-Joukowski 72
Scherkraft 36
Schräglaufwinkel 36
Schubmodul 36
Schwingung 24
Seitenführungskraft 36
Seitenkraft 37
Stabilität 79
Strömungsfeld 67
Strömungslinie 67
T
Theoretische Effizienz 54
Tragflächenprofil 67
Turbulenz 86
TVD 84
U
Übereinstimmung 79
Überkritische Dämpfung 28
Übersteuern (ÜS) 38
Ungefederte Masse 46
Untersteuern (US) 38
V
Verfahren 82
Verstärkung 32
W
Wanken 39
Wirbelfaden 71
Wärmekraftmaschine 52

Übersicht: Mechanik

2

BAUFORM

KAPITEL 02 Mechanik

Grundlegende Eigenschaften

Die Eigenschaften und Leistungen verschiedener Fahrzeuge variieren je nach ihrem Einsatzbereich enorm. Bei der Auswahl eines Fahrzeugs ist es deshalb von großer Bedeutung, die Grundprinzipien hinter den einzelnen Leistungsdaten zu verstehen.

Abmessungen

Das Fahrgestell eines Autos und die Anordnung der Bauteile sind die grundlegendsten Spezifikationen und werden während der Anfangsphase der Entwicklung gewählt. Deshalb ist es äußerst schwierig, sie im späteren Verlauf noch zu ändern. Diese Spezifikationen haben wesentliche Auswirkungen auf die drei Hauptfunktionen: das Fahren, das Steuern und das Bremsen. Etwaige Mängel können nur schwer durch Tuning kompensiert werden und schon die kleinste Änderung hat möglicherweise eine wesentliche Auswirkung auf die Leistung. Außerdem sind die durch Tuning erzielten Effekte stark vom Ausgangspotenzial des Autos abhängig. Um das meiste aus Ihrem Auto zu holen, sollten Sie sich damit vertraut machen, welchen Einfluss diese grundlegenden technischen Daten auf die Fahrleistung des Autos haben.

Radstand

Der „Radstand" ist – von der Seite gesehen – der Abstand vom Mittelpunkt der Vorderräder bis zum Mittelpunkt der Hinterräder. Diese Länge hat eine große Auswirkung auf die Stabilität des Autos. Je größer der Radstand, desto weniger anfällig ist das Auto für Unebenheiten in der Straßenoberfläche und Seitenwind. Außerdem fährt das Auto tendenziell stabiler auf einer geraden Linie. Auf der anderen Seite ist ein kurzer Radstand zwar weniger stabil, die Ansprechbarkeit bei Lenkbewegungen wird allerdings verbessert und das Auto ist in Kurven beweglicher. In puncto Fahrkomfort wird jedoch ein längerer Radstand generell als besser angesehen.

Überhang

Der Frontüberhang ist die Länge des Autos, die sich von der Mitte der Vorderräder bis zum vordersten Ende der Frontstoßstange erstreckt. Der Hecküberhang ist die Länge des Autos, die sich über die Mitte der Hinterräder zum Ende der Heckstoßstange erstreckt. Sind die Teile des Autos im Überhangbereich schwer, nimmt das Gierungsträgheitsmoment (der Lenkwiderstand) zu und die Manövrierbarkeit wird reduziert. Deshalb sollten Teile eines Autos mit signifikantem Gewicht möglichst innerhalb des Radstandes platziert sein – das gilt besonders für schwere Komponenten wie den Motor. Ein gewisser Überhang ist jedoch aus aerodynamischen Gründen unverzichtbar. Er darf also nicht vollkommen vermieden werden.

Die Leistung eines Autos hängt von seinen Abmessungen und seinem Gewicht ab

Spurbreite

Die „Spurbreite" bezeichnet den Abstand zwischen den linken und rechten Rädern eines Autos. Eine größere Spurbreite senkt den Schwerpunkt eines Fahrzeugs ab. Allgemein gilt, dass die Erhöhung der Spurbreite die Traktion bei Kurvenfahrten und eine Spurbreitenvergrößerung der Antriebsräder den Kontakt mit der Straßenoberfläche und dadurch die Leistungsübertragung auf die Straßenoberfläche verbessert. Eine schmalere Spurbreite bietet andererseits ein schnelleres Handling, reduziert jedoch auch die Stabilität. Bei Rennwagen ist es gängig, dass sie an Vorder- und Hinterrädern unterschiedliche Spurbreiten verwenden, um das Handling zu verbessern.

Höhe

Die Fahrzeughöhe wird von der Straßenoberfläche bis zum höchsten Punkt des Autos gemessen. Eine geringere Höhe bedeutet einen niedrigeren Schwerpunkt, wodurch die Wankbewegung bei Kurvenfahrten reduziert und in der Folge die Kurvengeschwindigkeit erhöht wird. Eine geringere Höhe bedeutet jedoch auch weniger Raum für die Passagiere und einen kürzeren Federweg (der Raum, der den Aufhängungsfedern zum Ausdehnen und zur Kompression zur Verfügung steht) und erhöht das Risiko, dass das Auto aufsetzt.

Gewicht

Das Gewicht wirkt sich unmittelbar auf die Fahrzeugleistung aus. Je leichter das Auto ist, desto weniger wird der Motor belastet und desto mehr Leistung kann zum Antrieb verwendet werden. Andere Vorteile sind eine geringere Abnutzung der Bremsen und ein effizienteres Kurvenverhalten. Das Gewicht eines Autos geteilt durch seine Maximalleistung nennt man Leistungsgewicht oder Masse-Leistungs-Verhältnis. Je kleiner dieses Verhältnis, desto schneller kann das Auto beschleunigen und desto sportlicher ist das Fahrverhalten. Das hat auch großen Einfluss auf die Kraftstoffeffizienz, und die Gewichtsreduzierung ist in der Fahrzeugherstellung heute ein wichtiger Faktor, wenn es um Umweltverträglichkeit und Leistung geht.

Antriebe und Gewichtsverteilung

Wie Größe und Gewicht ist auch der Antrieb eine weitere grundlegende Eigenschaft des Autos. Die Spezifikationen für den Antrieb sind Buchstabenpaare, die die Position des Motors und der Antriebsräder an der „Front", in der „Mitte" oder im „Heck" (engl.: Rear) beschreiben, wobei der erste Buchstabe für die Position des Motors und der zweite für die Position der Antriebsräder steht. FF (Frontmotor/Frontantrieb), FR (Frontmotor/Heckantrieb), MR (Mittelmotor/Heckantrieb) und RR (Heckmotor/Heckantrieb) sind einige der gebräuchlicheren Antriebsspezifikationen. Diese Information ist wichtig, da die Position des Motors (des schwersten Teils des Autos) und der Antriebsräder eine große Auswirkung auf Gewichtsverteilung und Handling des Autos haben.

Bei Autos mit guter Gewichtsverteilung wird die Motorkraft effizient an die Antriebsräder abgegeben und hat einen positiven Einfluss auf Start und Beschleunigung. Auch das Bremsen bei hoher Geschwindigkeit wird effektiver, da das Auto sich weniger nach vorne neigt.

Aber der wichtigste Vorteil einer guten Gewichtsverteilung ist das verbesserte Kurvenverhalten. Fahrzeuge mit einer schlechten Gewichtsverteilung können durch die Zentrifugalkraft leichter instabil werden und das Risiko, dass sie unkontrolliert ins Schleudern geraten, ist höher.

Die ideale Gewichtsverteilung beträgt 50:50 zwischen vorn und hinten sowie links und rechts. Bei FR-Autos, bei denen der Motor vorn und die Antriebsräder hinten positioniert sind, ist diese Gewichtsverteilung leicht zu erreichen. FF-Autos (und Autos mit Allradantrieb, die häufig auf einem FF-Layout basieren), bei denen der Motor und die Antriebsräder vorn positioniert sind, sind jedoch front- und RR-Autos hecklastig. Bei den meisten modernen FF-Autos wird in dem Versuch, die Gewichtsverteilung zu optimieren, der Motor „quer" montiert („seitwärts" im Verhältnis zur Fahrtrichtung).

Es ist aber keineswegs unmöglich, Nachteile in Sachen Gewichtsverteilung zu kompensieren, und teilweise können sie durch Tuning und ausgleichende Fahrweise verbessert. Doch kleine Unterschiede wie diese sind der Grund dafür, dass ein Rennwagen mit MR-Antriebslayout gegen ein FR-Auto mit guter Lastverteilung gewinnen würde.

Manövrierbarkeit und Grundstruktur

Antriebstypen

FR

Frontmotor, Heckantrieb

Bei diesem konventionellen Antriebslayout befindet sich der Motor vorn und die Antriebsräder sind hinten positioniert. In Fahrzeugen mit diesem Layout ist eine ausgeglichene Gewichtsverteilung leicht zu erreichen. Neben den guten Handlingeigenschaften bietet es ein gutes Gefühl für die Lenkung, da die Räder für das Lenken (vorne) nicht zugleich für den Antrieb genutzt werden (der hinten erfolgt). Auf einigen Oberflächen kann es jedoch zu Problemen mit der Traktion (und damit der Antriebsleistung) kommen.

FF

Frontmotor, Frontantrieb

Ein Antriebslayout, bei dem sowohl der Motor als auch die Antriebsräder vorn positioniert sind. Die gemeinsame Positionierung des schweren Motors und des Getriebes vorn im Auto bedeutet, dass der Fahrgastraum größer sein kann, führt aber unweigerlich zu einer frontlastigen Gewichtsverteilung. Außerdem wird die Bodenhaftung der Vorderräder, die für Antrieb und Lenken zuständig sind, bei Kurvenfahrten zwischen der Beibehaltung der Vorwärtsbewegung und der Lenkbewegung aufgeteilt. Aus diesen Gründen ist dieses Layout relativ ungeeignet für Fahrzeuge mit hoher Leistung.

MR

Mittelmotor, Heckantrieb

Bei diesem Antriebslayout ist der Motor, der die Hinterräder antreibt, in der Mitte des Wagens positioniert. Die Platzierung des Motors nahe der Fahrzeugmitte bringt ihn näher zum Schwerpunkt des Autos, was schärfere Kurvenfahrten ermöglicht. Außerdem wird so beim Beschleunigen und Abbremsen die maximale Bodenhaftung für Vorder- und Hinterreifen garantiert. Dieses Antriebslayout wird gerne für Sport- und Rennwagen gewählt, die auf Geschwindigkeit ausgelegt sind.

RR

Heckmotor, Heckantrieb

Ein Hinterradantriebslayout, bei dem der Motor im hinteren Überhang hinter den Rädern verbaut wird. Dieses Layout konzentriert das Gewicht im hinteren Teil des Fahrzeugs, wodurch die Hinterräder auf die Straßenoberfläche gedrückt und auf diese Weise Traktion und Beschleunigung verbessert werden. Die Last auf den Vorderrädern wird jedoch reduziert – ein Umstand, der bei der Kurveneinfahrt ein Untersteuern begünstigt. Außerdem liegt so viel Gewicht auf den Hinterrädern, dass das Heck, wenn es ausbrechen sollte, das sehr heftig tut. Um das aufzufangen, sind gute fahrerische Fähigkeiten erforderlich.

4WD

Allradantrieb

Bei dieser Konfiguration wird die Leistung auf alle vier Räder übertragen. Trotz des zusätzlichen Gewichts bietet dieses Antriebslayout optimale Eigenschaften für stehende Starts und Beschleunigung. Allerdings kann die extreme Stabilität das Einlenken erschweren. Es ist möglich, sämtliche Antriebslayouts in allradgetriebene Fahrzeuge umzuwandeln, aber das Antriebslayout, auf dem es basiert, hat letztlich einen großen Effekt auf das Handling. In der Regel werden entweder die Vorder- oder die Hinterräder als „Haupt"-Antriebsräder angesehen und an die beiden übrigen Räder wird mehr Drehmoment übertragen, sobald die „Haupt"-Antriebsräder durchdrehen.

Das Herz des Automobils

Der Motor bildet das Herz eines Autos. Ein Verständnis für den Motor und seine Funktionsweise ist der Schlüssel zu einer optimalen Nutzung eines Fahrzeugs.

Mechanik und Prinzipien

Die meisten Autos sind mit Viertakt-Hubkolbenmotoren ausgerüstet. Sie bestehen aus Zylindern, in denen sich die Kolben vor und zurück bewegen, um Energie zu erzeugen. Die vier Takte des Motors sind: Ansaugen, Verdichten, Arbeiten und Ausstoßen.

Werfen wir einen genaueren Blick auf diese vier Takte. Beim Ansaugen öffnet sich das Einlassventil, kurz bevor der Kolben den oberen Totpunkt erreicht – die Position, bei der der Kolben das obere Ende des Zylinders erreicht. Sobald sich der Kolben wieder nach unten bewegt, wird durch das offene Ventil ein Kraftstoff-Luft-Gemisch angesaugt. Hat der Kolben den Grund des Zylinders erreicht, ist der Ansaugtakt beendet und der Verdichtungstakt beginnt, bei dem sämtliche Ventile geschlossen sind und der aufsteigende Kolben das Kraftstoff-Luft-Gemisch im Zylinder verdichtet.

Unmittelbar nachdem der Kolben die Spitze des Zylinders erreicht hat und das Kraftstoff-Luft-Gemisch maximal komprimiert ist, erzeugt die Zündkerze einen Zündfunken, der das Kraftstoff-Luft-Gemisch zur Explosion bringt. Das ist das „Arbeiten", bei dem im Inneren des Zylinders Temperaturen von bis zu 2000 °C und ein Druck von bis zu 200 Atmosphären erreicht werden können. Diese hohe Temperatur und der hohe Druck sorgen für eine Kompressionskraft, die den Kolben wieder nach unten schiebt und die Kurbelwelle antreibt und so die thermale Energie in mechanische (Rotations-)Energie umwandelt.

Wenn der Kolben wieder den unteren Teil des Zylinders erreicht, beginnt der Ausstoßtakt und die Auslassventile werden geöffnet, damit die verbrannten Gase ausgestoßen werden können. Diese Gase werden nicht über die Kolbenbewegung ausgestoßen – hauptsächlich bewirken ihre eigene Hitze und der hohe Druck, dass sie durch die Ventile gepresst werden. Sobald der Kolben wieder das obere Ende des Zylinders erreicht, wird das Einlassventil geöffnet und der Zyklus beginnt erneut.

Ein Hubkolbenmotor durchläuft diese vier Takte und dreht die Kurbelwelle im Leerlauf mehrere hundert Male pro Minute und bei hohen Geschwindigkeiten mehrere Tausend Male pro Minute, um kontinuierlich Motorkraft für das Auto zu erzeugen.

Wie funktioniert ein Motor?

Verschiedene Zylinder-Konfigurationen

Reihenmotor

Mehrere Zylinder sind in einer einzigen Reihe angeordnet. Sämtliche Zylinder sind über eine Kurbelwelle miteinander verbunden und der Zylinderblock besteht aus einem Stück. Aufgrund der einfachen Konstruktion kann der Motor relativ leicht gehalten werden. Aber je mehr Zylinder zum Einsatz kommen, desto länger wird der Motor, was zu einem Nachteil hinsichtlich des benötigten Platzes im Fahrzeug werden kann.

V-Motor

Links und rechts in V-Form gegenüberliegend angeordnete Zylinder. Die Kurbelwelle kann kürzer sein und diese Konfiguration hat den Vorteil, selbst bei einer hohen Zylinderzahl kompakt zu bleiben. Ungeachtet der Anzahl der Zylinder ist die Vibration gering, und der kurze Zylinderblock und die kurze Kurbelwelle bieten Vorteile in Sachen Verwindungssteifigkeit.

Boxermotor

Horizontal angeordnete, gegenüberliegende Zylinder. Die rechten und linken Zylinder stehen sich horizontal gegenüber mit der Kurbelwelle in der Mitte. Er wird Boxermotor genannt, weil die sich links und rechts bewegenden Kolben an die Fausthiebe eines Boxers erinnern. Der Vorteil dieses Motors ist sein aufgrund der reduzierten Höhe niedriger Schwerpunkt.

W-Motor

Damit meinte man früher immer einen Motor mit einer einzelnen Kurbelwelle mit drei Reihen Zylindern, die in W-Form angeordnet sind, aber in den letzten Jahren werden zwei verbundene V-Motoren ebenfalls W-Motor genannt. Der W-Motor ist breiter als zum Beispiel der V-Motor, aber aufgrund der kürzeren Kurbelwelle eignet er sich für Motoren mit zwölf oder mehr Zylindern.

Ventilkonfigurationen

In einem Viertaktmotor kommen zwei Ventiltypen zum Einsatz: die Einlassventile, die sich während der Ansaugphase öffnen und den Zustrom des Kraftstoff-Luft-Gemisches in den Motor ermöglichen, und die Auslassventile, die während der Ausstoßphase geöffnet werden und die Abgase hinauslassen. Die Ventile befinden sich im Zylinderkopf und spielen eine wichtige Rolle für das Öffnen und das Abdichten des Brennraums.

Bei modernen Motoren befindet sich die Nockenwelle in der Regel oben im Motor, was eine zuverlässigere Ventilbewegung ermöglicht. Die meisten modernen Motoren verfügen über vier Ventile pro Zylinder, zwei Einlass- und zwei Auslassventile, aber Motoren, die auf Verbrennungseffizienz im niedrigen Drehzahlbereich ausgerichtet sind und zwei Ventile pro Zylinder haben, ein Einlass- und ein Auslassventil, werden in Zukunft wohl ein Comeback feiern.

Der neueste Trend geht in Richtung der variablen Ventilsteuerung. Anfänglich erlaubte dieses System den Ventilen zwei Einstellungen (eine für niedrige Drehzahlen, eine für höhere Drehzahlen) aber neueste Entwicklungen ermöglichen mittlerweile eine kontinuierliche Veränderung der Steuerzeiten und des Ventilhubs, um sie der Drehzahl des Motors anzupassen. Bei der Ventilsteuerung im neusten „Valvetronic"-BMW-Motor wird die Leistungsabgabe ohne Drosselklappe reguliert, was zu höherer Effizienz führt.

Arten der Ventilkonfiguration

DOHC

Double Overhead Camshaft – Doppelte oben liegende Nockenwellen

Die englische Abkürzung „DOHC" steht für „doppelte oben liegende Nockenwellen". In einem DOHC-Motor betätigt eine Nockenwelle die Einlassventile und eine weitere die Auslassventile. Neben der Sicherstellung des stabilen Funktionierens durch die Aufgabenverteilung auf zwei Nockenwellen sorgt das für weniger Hubmasse (Trägheit) in der Ventilsteuerung und ermöglicht so höhere Motordrehzahlen. Auf diese Weise kann wiederum eine bessere Leistungsabgabe erreicht werden – weshalb diese Bauweise in den meisten modernen Hochleistungsmotoren zum Einsatz kommt.

SOHC

Single Overhead Camshaft – Einzelne oben liegende Nockenwelle

Ein Motor mit einer einzelnen oben liegenden Nockenwelle verfügt nur über eine Nockenwelle, die Einlass- und Auslassventile betätigt. Je nach Art des Brennraums kann die Nockenwelle die Ventile entweder direkt betätigen oder über Kipphebel. Die Ventilbewegungen sind im Vergleich zu einem OHV-Motor verlässlicher und höhere Drehzahlen sind möglich. Im Vergleich zu einem DOHC-Motor sind die Ventilbewegungen weniger sanft, aber es existieren auch hochdrehende SOHC-Motoren – die Leistung muss also nicht immer geringer sein.

OHV

Overhead Valve – OHV-Ventilsteuerung

Ein Motor mit oben liegenden Ventilen ist, wie der Name schon sagt, ein System, bei dem die Ventile auf dem Zylinderkopf montiert sind. Anders als beim SOHC- oder DOHC-Setup befindet sich die Nockenwelle an der Seite der Zylinder und betätigt die Ventile über lange Arme, sogenannte „Stößelstangen". Diese Struktur ist einfach und leicht zu warten. Allerdings ist die Ventilarbeit in dieser Art Motoren bei hohen Drehzahlen weniger verlässlich und im Allgemeinen weniger für hohe Leistungsanwendungen geeignet.

Wankelmotoren

Wankelmotoren (auch Rotationskolbenmotoren genannt) erzeugen ihre Leistung auf ähnliche Weise wie Hubkolbenmotoren, indem sie die vier Stufen des Ansaugens, Verdichtens, Arbeitens und Ausstoßens durchlaufen. Allerdings laufen diese Prozesse anders ab.

Anstelle von Zylindern besitzen diese Motoren ein kokonartiges Kolbengehäuse (in Form einer Epizykloide) mit einem dreieckigen Rotationskolben darin. Dieser Kolben rotiert in seinem Gehäuse um die Welle, wobei sich die Räume zwischen ihm selbst und dem Gehäuse vergrößern und verkleinern. In diesen Räumen finden die Takte Ansaugen, Verdichten, Arbeiten und Ausstoßen statt. Ein Wankelmotor besteht meist aus zwei oder drei solcher in genauso vielen Gehäusen rotierenden Kolben.

Bei gängigen Motoren ist die gleichmäßige Steuerung der Leistung aufgrund der Hin- und Herbewegung mehrerer Kolben schwieriger und es entsteht deutlich mehr Lärm und Vibration. Da Wankelmotoren auf einer Drehbewegung basieren, läuft der Motor viel sanfter. Ein weiterer Vorteil dieser Motorenart sind die fehlenden Ventile, was die Anzahl der Teile stark verringert. Auch waren Wankelmotoren merklich leichter, und obwohl dieser Unterschied dank technischer Fortschritte in der Entwicklung von Hubkolbenmotoren verringert werden konnte, stellen Wankelmotoren noch immer die kompaktere der beiden Bauarten dar.

In einem Wankelmotor wird das Timing von Ansaug- und Ausstoßprozess von der Form und Anordnung der Kanäle in der Wand des Kolbengehäuses (der Kanäle, durch die die Gase ein- und ausströmen) vorgegeben. Um Einlass und Auslass eines Wankelmotors zu tunen, müssen Form und Position dieser Kanäle verändert werden. Weiterhin funktionieren Wankelmotoren gut mit Turboladern, da sie kein Auslassventil besitzen und die Abgase direkt und ohne Widerstände durch den Auslasskanal ausgestoßen werden.

Im Vergleich zum Hubkolbenmotor weist der Wankelmotor einen Nachteil in Bezug auf den Kraftstoffverbrauch auf. Dies liegt an der im Verhältnis zum Brennraumvolumen relativ großen Oberfläche, was zu erhöhtem Hitzeverlust und verringerter Effizienz bei der Umwandlung von Wärmeenergie in mechanische Energie führt.

Motoraufladung

Erhöht man die Luftmenge, die in einen Motor einfließt, erhöht sich auch die Leistung. Am einfachsten erreicht man dies durch eine Vergrößerung des Hubraums.

Man kann jedoch auch einen ähnlichen Effekt erzielen, ohne den Hubraum zu verändern, und zwar durch die sogenannte „Motoraufladung". Dabei wird durch Verdichtung mehr Luft in den Motor gepresst. Die dazu benötigten Komponenten werden in zwei Kategorien unterteilt: Lader und Turbolader.

Die zusätzliche Druckmenge beim Verdichten der Luft wird „Ladedruck" genannt, und je mehr Ladedruck, desto mehr Leistung kann erzielt werden. Eine Einheit Atmosphärendruck entspricht einem Bar, d. h. 1 kg/cm² Luft. Beträgt der Ladedruck ein Bar, gelangt die Luft mit insgesamt zwei Bar in den Motor (ein Bar natürlicher Luftdruck plus ein Bar durch die Erhöhung), also mit einem Druck, der doppelt so hoch ist wie der normale Druck.

Das Problem bei der Motoraufladung ist der mit zunehmendem Druck verbundene Anstieg der Verbrennungsenergie, die den Motor beschädigen kann. Aus diesem Grund werden bei Motoren mit Turbolader oder Kompressor meist verstärkte innere Motorkomponenten verwendet und das Verdichtungsverhältnis wird verringert, um dem Problem der übermäßigen Verbrennung entgegenzuwirken.

Wird Luft verdichtet, steigt ihre Temperatur und ihre Dichte nimmt ab. Dieser Effekt verstärkt sich noch bei intensiven Fahrbedingungen oder heißem Wetter und verhindert, dass der Motor seine maximale Leistung erreicht. Man sagt, dass ein Grad mehr Temperatur zu einem Verlust von etwa einem PS führt, daher wird meist ein Zwischenkühler eingebaut, um die verdichtete Luft abzukühlen.

Turbolader setzen verzögert ein, da ihre Aufladung von der

Kompressoren

Ein Kompressor wird normalerweise von einem Riemen angetrieben, der mit der Kurbelwelle verbunden ist. Er verdichtet die Luft, bevor sie in den Motor eingeführt wird. Da der Kompressor durch die Drehung der Kurbelwelle angetrieben wird, sorgt er bei niedriger Drehzahl für einen großen Aufladungseffekt und das Ansprechverhalten des Gaspedals ist dem eines Turboladers überlegen. Kompressoren funktionieren zumeist auch gut in Fahrzeugen mit Automatikgetrieben. Das Schaubild zeigt ein sogenanntes „Roots-Gebläse", doch es gibt noch andere Arten von Kompressoren, darunter Lysholm-Kompressoren und Scrollverdichter.

Denselben Effekt wie bei einer Hubraumvergrößerung erzielen

Energie der Abgase angetrieben wird und es eine Zeitverzögerung bis zum Anstieg des Ladedrucks gibt. Kompressoren hingegen, die von der Kurbelwelle des Motors angetrieben werden, weisen diese Zeitverzögerung nicht auf, aber sie verbrauchen wiederum eine kleine Menge der vom Motor erzeugten Energie für den Antrieb durch die Kurbelwelle.

In jüngerer Zeit finden Motoren Beachtung, die die Vorteile beider Bauweisen vereinen, indem bei niedriger Drehzahl ein Kompressor zum Einsatz kommt und bei hoher Drehzahl ein Turbolader.

Turbolader

Der Name „Turbo" kommt von der Turbine, die seinen Kompressor antreibt. Ein Turbolader nutzt die ausgestoßenen Abgase zum Antrieb seiner Turbine. Durch die Nutzung der Abgasenergie kommt es bei hohen Drehzahlen nicht zu einem Leistungsverlust wie bei einem Lader. Aufgrund der geringeren Abgasmenge dreht sich die Turbine jedoch bei niedrigen Drehzahlen nicht auf Betriebsgeschwindigkeit, und beim Beschleunigen braucht es einige Zeit, bis sie in Schwung kommt (schneller wird). Diese verzögerte Reaktion bezeichnet man als „Turboloch". Es wurden bereits verschiedene Systeme entwickelt, um dies zu kompensieren, und es wird weiter an ihnen gearbeitet. In Europa kommen Turbolader zunehmend in kleineren Motoren für eine bessere Kraftstoffeffizienz zum Einsatz.

Hybridsysteme

Sinn und Zweck eines Hybridsystems ist es, durch den Einsatz eines Verbrennungs- und eines Elektromotors eine höhere Kraftstoffeffizienz zu erzielen. Japan war lange Zeit führend in der Entwicklung von Hybridfahrzeugen, und obwohl diese Hybridsysteme hauptsächlich für ihre Umweltverträglichkeit bekannt sind, sind europäische Sportwagenhersteller dazu übergegangen, sie für die Entwicklung einer neuen Generation von Hochleistungsfahrzeugen zu nutzen.

Die Schwäche eines Verbrennungsmotors liegt in seiner Ineffizienz im Leerlauf und beim Beschleunigen aus dem Stand. Ein Elektromotor andererseits kann sein maximales Drehmoment bei fast null Umdrehungen erreichen und dank seiner hohen Effizienz bei niedrigen Drehzahlen die schlechte Leistung eines Verbrennungsmotors in diesem Bereich ausgleichen. Ein Verbrennungsmotor ist wiederum bei hohem Tempo immer noch leistungsfähiger, sodass die Effizienz des Hybridautos insgesamt durch die Kombination der Stärken beider Systeme erreicht wird.

Ein weiterer Vorteil eines Elektromotors mit Batterie besteht darin, dass ein Hybridsystem auch in der Lage ist, Energie aufzufangen. Wenn der Fuß vom Gaspedal genommen oder gebremst wird, agiert der Motor als durch die Drehung der Räder angetriebener Generator und lädt die Batterie auf. Diese Energie kann dann anschließend zum Antrieb des Elektromotors genutzt werden. Auf diese Art kann Energie, die normalerweise beim Bremsen als Hitze verloren geht, zur Erzeugung von Strom genutzt werden.

Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass der Elektromotor die Funktion eines Kompressors für den Verbrennungsmotor übernehmen kann. Viele der in Europa hergestellten Hybridfahrzeuge machen sich diesen Vorteil zunutze und man verfolgt das Ziel, das Fahrgefühl eines Motors mit großem Hubraum mit einem kleinen Motor zu erreichen, indem man Elektromotoren statt Kompressoren einsetzt. Hybridsysteme und ihre Vorteile variieren je nach Art und Weise, wie Elektro- und Verbrennungsmotor zusammenarbeiten. Es gibt heute verschiedene Arten der Hybridsysteme für den kommerziellen Gebrauch, aber diese Vielfalt wird wohl noch größer werden. Derzeit werden Hybridsysteme für Supersportwagen entwickelt und es bleibt abzuwarten, welche Art System in Zukunft eingesetzt wird.

Fahren mit Verbrennungs- und Elektromotor

Der Toyota Prius

Systemüberblick

Beim Beschleunigen aus dem Stand oder niedriger/mittlerer Geschwindigkeit

Beim Beschleunigen aus dem Stand oder Fahren mit niedriger bis mittlerer Geschwindigkeit ist der Verbrennungsmotor nicht effizient und wird abgeschaltet. Der Antrieb erfolgt allein durch den Elektromotor.

Normale Fahrt

Die Motorleistung wird vom Kraftverteilungsmechanismus auf zwei Systeme verteilt. Eins treibt den Generator und eins direkt die Räder an.

Starkes Beschleunigen

Angetrieben von der Batterie. Der Schub von Verbrennungs- und Elektromotor wird kombiniert, was zu gutem Ansprechverhalten und sanfter Beschleunigung führt.

Abbremsen und Bremsen

Die Räder treiben den Elektromotor an, der als Generator fungiert und die Bremsenergie des Autos effizient in Elektrizität umwandelt, mit der die Batterie aufgeladen wird (auch regeneratives Bremsen genannt).

Batterieaufladung

Die Batterie soll ein konstantes Ladeniveau beibehalten. Sinkt die Ladung der Batterie, schaltet sich der Verbrennungsmotor ein, treibt den Generator an und lädt die Batterie auf.

Arten von Hybridsystemen

Serieller Hybrid

Die Rolle des Verbrennungsmotors liegt einzig darin, den Generator anzutreiben, und das Auto selbst wird nur vom Elektromotor angetrieben. Dieses System ist sehr einfach und der Verbrennungsmotor kann an jeder beliebigen Stelle verbaut werden. Im Grunde handelt es sich um ein Elektroauto mit Generator.

Paralleler Hybrid

Verbrennungs- und Elektromotor arbeiten parallel. Der Elektromotor ist in der Regel zwischen Verbrennungsmotor und Getriebe angebracht, was für eine hohe Produktivität sorgt. Der verkleinerte Verbrennungsmotor spielt hier bei der Erzeugung der Antriebskraft die Hauptrolle und der Elektromotor soll den Verbrennungsmotor unterstützen und so gleichzeitig die Leistung maximieren und den Kraftstoffverbrauch optimieren.

(Anwendungsfall)
Honda INSIGHT
Honda CIVIC Hybrid

Mischhybrid

Auch bekannt als leistungsverzweigter Hybrid. Der Kraftverteilungsmechanismus nutzt ein Planetengetriebe, um die Energie zwischen Generator und Motor aufzuteilen. Beim anfänglichen Beschleunigen und bei niedriger Geschwindigkeit liefert die Batterie die Energie, während bei normaler Fahrt der Verbrennungsmotor in einem effizienten Drehzahlbereich läuft und dabei den Generator antreibt und die Batterie auflädt.

(Anwendungsfall)
LEXUS HS250h
Toyota Prius

Schlagworte zur Leistung

Wenn man sich die technischen Katalogdaten eines Fahrzeugs ansieht, wird man mit einer Menge Zahlen und Spezialbegriffen konfrontiert. Es ist wichtig, diese zu kennen, wenn man Eigenschaften und Potenzial eines Autos wirklich verstehen will.

Es gibt fünf Grundbegriffe, die das Potenzial eines Motors definieren. Vielleicht glauben Sie, dass Sie mit Begriffen wie „Pferdestärken" und „Drehmoment" bestens vertraut sind, aber um wirklich zu verstehen, was sie für die Leistung eines Autos bedeuten, werfen wir einen genaueren Blick darauf.

Pferdestärken

Die Pferdestärken bezeichnen die Obergrenze der Motorleistung – sie werden in der Regel in der Einheit „PS" (oder „HP") angegeben. Eine Pferdestärke beschreibt die Fähigkeit des Motors, eine Last von 75 kg in einer Sekunde einen Meter weit zu tragen. In anderen Worten: Ein 100-PS-Motor kann bei Maximalleistung eine Tonne in einer Sekunde 7,5 Meter weit tragen. Die Pferdestärken werden errechnet, indem man das Drehmoment mit den Umdrehungen des Motors multipliziert – also kann ein Motor mit geringem Hubraum immer noch eine hohe Ausgangsleistung produzieren, wenn er hoch genug drehen kann. In der jüngeren Zeit werden die PS zumeist in kW angegeben (1 PS=0,735 kW).

75 kg

1 PS
||
Die Arbeit, die erforderlich ist, um ein Gewicht von 75 kg in einer Sekunde einen Meter weit zu tragen.

1 Sekunde
1 m

Drehmoment

Das Drehmoment ist eine Maßeinheit für die Rotationskraft. Ein Beispiel: Zieht man eine Mutter mithilfe eines ein Meter langen Schraubenschlüssels mit einer Kraft von 1 kg an, so erzeugt man eine Drehkraft oder ein Drehmoment von 1 kg/m. Auf den Motor bezogen beschreibt das Drehmoment die Menge an Kraft, die eingesetzt wird, um die Kurbelwelle zu drehen.

Je höher das Drehmoment, desto stärker die Kraft, die die Drehzahl des Motors aufrechterhält, und desto einfacher kann der Fahrer den Motor kontrollieren.

1 kg
1 m

1 kg-m
||
Die Drehkraft, die ein Gewicht von 1 Kilogramm bei einer Entfernung von 1 Meter von der Kurbelwelle drehen würde.

Hubraum/Anzahl der Zylinder

Der Hubraum beschreibt das Volumen des Kraftstoff-Luft-Gemisches, das in den Motor strömt. In einem Hubkolbenmotor wird dieses Volumen berechnet, indem das Volumen der Zylinder, in denen sich der Kolben bewegt, mit der Anzahl der Zylinder multipliziert wird.

Je größer der Hubraum, desto größer die Ausgangsleistung – aber je größer das Volumen eines einzelnen Zylinders, desto unruhiger läuft der Motor. Daher wird die Anzahl der Zylinder erhöht, damit das Volumen pro Zylinder gering bleibt. Außerdem erhöht eine größere Anzahl Zylinder auch die Anzahl der Verbrennungszyklen pro Kurbelwellendrehung und der Motor dreht sanfter.

Generell sagt man, dass der Hubraum eines Zylinders irgendwo zwischen 350 ccm und 600 ccm liegen sollte. Da Motoren mit vielen Zylindern aber teurer sind, wird die Größe der Zylinder in der Regel durch Größe und Klasse des Autos vorgegeben.

Hubverhältnis

Das Hubverhältnis ist die Beziehung zwischen dem Durchmesser des Zylinders (Bohrung) und der Länge der Kolbenbewegung innerhalb des Zylinders. Motoren mit einem Verhältnis von weniger als 1:1 werden „kurzhubige" Motoren genannt, während jene mit einem Verhältnis von mehr als 1:1 „langhubig" genannt werden. Bei einem Verhältnis von exakt 1:1 spricht man von einem „quadratischen Querschnitt". Die Größe des Hubverhältnisses beeinflusst das Verhalten des Motors. Generell sagt man, dass ein langhubiger Motor bei niedrigen bis mittleren Drehzahlen ein optimales Drehmoment erzeugen kann, in den höheren Drehzahlen aber nur geringe Leistung erzielt, während für einen kurzhubigen Motor das Gegenteil gilt.

Eine weitere nützliche Information: Wenn der Kolben sich am oberen Zylinderende befindet, nennt man das „oberer Totpunkt". Befindet er sich am unteren Ende, spricht man vom „unteren Totpunkt".

Verdichtungsverhältnis

Das Verdichtungsverhältnis beschreibt, wie sehr das Kraftstoff-Luft-Gemisch, das in den Motor gelangt, komprimiert wird. Das Verdichtungsverhältnis hat einen großen Einfluss auf die Motorleistung.

Um das Verdichtungsverhältnis zu errechnen, wird das Volumen des vollständig eingefahrenen Zylinders („Zylindergesamtvolumen") durch das Volumen des vollständig ausgefahrenen Zylinders („Kompressionsvolumen") geteilt. Das Zylindergesamtvolumen ist der Hubraum plus das Kompressionsvolumen.

In einem Vierzylinder-Motor mit 2000 ccm zum Beispiel beträgt der Hubraum pro Zylinder 500 ccm. Bei einem Kompressionsvolumen von 50 ccm beträgt das Zylindergesamtvolumen 550 ccm. 550 ccm geteilt durch das Kompressionsvolumen (50 ccm) ergibt ein Verdichtungsverhältnis von 11:1.

In der Regel haben Saugmotoren ein Verdichtungsverhältnis zwischen 9:1 und 11:1. Ein Verdichtungsverhältnis von über 10:1 produziert eine hohe Leistung angesichts der Größe des Hubraums. Motoren mit künstlicher Aufladung haben generell ein Verdichtungsverhältnis zwischen 7:1 und 9:1.

Die Umwandlung von Kraft in Geschwindigkeit

Um Kraft in Geschwindigkeit umzuwandeln, benötigt man ein Getriebe und Traktion. Die einzelnen Teile des Antriebs haben einen enormen Einfluss auf die Fahrleistung.

Getriebe

Die Drehzahl eines Motors beträgt zwischen mehreren Hundert und mehreren Tausend Umdrehungen pro Minute. Das wäre zu schnell, um die Räder direkt anzutreiben, also ist ein vermittelnder Mechanismus vonnöten. Hier kommt das Getriebe ins Spiel. Das Getriebe verwendet unterschiedliche Zahnräder, um die in jeder Situation angemessene Menge Leistung und Geschwindigkeit auf die Räder zu übertragen.

Werfen wir einen genaueren Blick auf die Funktionsweise von Zahnrädern. Treibt ein kleines Zahnrad ein größeres Zahnrad an, dreht sich das größere Zahnrad langsam, aber sein Drehmoment ist erhöht. Treibt andererseits ein großes Zahnrad ein kleineres Zahnrad an, dreht sich das kleine Zahnrad schneller, aber mit weniger Drehmoment.

Das Getriebe macht sich dieses Prinzip zunutze, um der jeweiligen Situation den passenden Gang (das passende Zahnrad) zuzuweisen. Die größte Leistung benötigt ein Auto beim Beschleunigen aus dem Stand und nur eine vergleichsweise geringe Leistung, um eine konstante Geschwindigkeit zu halten. Deshalb wird zum Beschleunigen von 0 km/h ein großes Zahnrad (mit langsamer Drehung aber hoher Leistung) verwendet, um genug Leistung zu übertragen, die das Auto in Bewegung setzt.

Ein großes Zahnrad erzeugt viel Drehmoment, dreht sich jedoch langsamer. Das bedeutet, dass im ersten Gang selbst bei maximaler Drehzahl nur eine Geschwindigkeit von zwanzig oder ein wenig mehr Stundenkilometern erreicht wird. Deshalb werden mehrere Zahnräder verwendet, die beim Hochschalten allmählich immer kleiner werden, wodurch mehr Geschwindigkeit und weniger Drehmoment produziert wird. Die Fähigkeit, frei zwischen diesen Zahnrädern hin und her zu wechseln, gibt dem Fahrer die Möglichkeit, über den richtigen Gang das richtige Zahnrad für die jeweilige Situation auszuwählen.

Bei einem Auto wird das Übersetzungsverhältnis neben den Zahnrädern des Getriebes, die direkt mit dem Motor verbunden sind, durch die Kombination mit einem weiteren „Endantriebszahnrad" bestimmt, das sich zwischen dem Getriebe und den Antriebsrädern befindet. Das „Übersetzungsverhältnis" kann großen Einfluss auf die Fahrleistung eines Autos haben und bei Streckenrennen wird die Wahl des passenden Getriebes für den jeweiligen Parcours ein entscheidender Faktor bei der Verbesserung der Rundenzeiten sein.

[Grafische Darstellung eines manuellen Schaltgetriebes]

Antriebskraft

Das Endantriebszahnrad

Das Zahnrad, das die letzte Übermittlung der Motorleistung zu den Antriebsrädern übernimmt, ist das „Endantriebszahnrad". Es ist der letzte Schritt in der Kette, die die Umdrehungen des Motors auf eine angemessene Zahl übersetzt, um die Räder anzutreiben – außerdem ändert es in Fahrzeugen, bei denen der Motor längs montiert ist, die Richtung der Kraft um 90 Grad.

Das Endantriebszahnrad ist unabhängig vom Getriebe und ein Wechsel ist ein einfacher und häufig äußerst effektiver Weg, das Fahrverhalten eines Autos zu verändern. In Sportwagen ist das Übersetzungsverhältnis des Endantriebszahnrads in der Regel groß, um die Beschleunigungsleistung zu verbessern, aber wenn der Fokus auf die Wirtschaftlichkeit gelegt wird, kann ein kleineres Verhältnis verwendet werden, um die Drehzahl insgesamt zu reduzieren.

Zwei-Pedal-Getriebetypen

AG

► Automatisches Getriebe

Ein gängiges Getriebe, das einen Drehmomentwandler verwendet (eine Art „hydrodynamisches Getriebe"), um den Gang auf der Basis von Geschwindigkeit und Drehzahlen automatisch zu wechseln. Das System verwendet ein Planetengetriebe, das hydraulisch gesteuert wird. Es hat den Vorteil eines sanften Übergangs zwischen den Gängen, aber der Schlupf der Hydraulik und der Verlust wegen des Mechanismus verursacht einen hohen Kraftstoffverbrauch.

CVT

► Stufenloses Getriebe (Continuously Variable Transmission)

Ein stufenloses Getriebe wechselt nicht durch die einzelnen Gänge wie ein normales Getriebe. Stattdessen nutzt es zwei Riemenscheiben oder Kegelscheiben, die durch einen Metallriemen oder eine Kette miteinander verbunden sind, um nahtlos und kontinuierlich das Übersetzungsverhältnis anzupassen. Es ist extrem sanft, verursacht kein Ruckeln beim Schalten und ermöglicht dem Motor eine optimale effiziente Arbeitsweise unter annähernd sämtlichen Bedingungen.

DKG

► Doppelkupplungsgetriebe

Ein Doppelkupplungsgetriebe ist im Grunde genommen ein System, in dem die Arbeit eines manuellen Getriebes automatisiert wird, indem zwei Kupplungen eingesetzt werden. Ungerade und gerade Gänge werden auf zwei Wellen aufgeteilt, und durch schnelle Wechsel zwischen diesen beiden über die Kupplung zeigt dieses System ein Schaltverhalten, das jenem der manuellen Getriebe überlegen ist. Bei Automatikgetrieben sorgt das Drehlimit des Planetengetriebes für eine Begrenzung der maximalen Motordrehzahl. Das DKG ist dagegen mit hochdrehenden Motoren kompatibel. Dieses Getriebesystem wird sich weiter verbreiten und ist sowohl für Sportwagen als auch für energieeffiziente Autos geeignet.

Das Rad an der Kurvenaußenseite dreht sich schneller als das an der Kurveninnenseite.

Ausgleichskegelräder ermöglichen Rotationsdifferenzen zwischen dem linken und rechten Rad.

Differenzial

In Fahrzeugen mit Antriebsrädern auf beiden Seiten ist ein Differenzial absolut unerlässlich. Führen wir immer nur geradeaus, bräuchte niemand ein Differenzial, aber sobald ein Auto eine Kurve fährt, wird deutlich, warum ein Differenzial unbedingt erforderlich ist.

Bei Kurvenfahrten müssen die Räder an der Kurvenaußenseite eine weitere Strecke zurücklegen als die Räder an der Innenseite. Könnten die Innen- und Außenräder in dieser Situation nicht mit unterschiedlicher Geschwindigkeit angetrieben werden, würde das Innenrad durchdrehen und das Auto könnte nur schwer eine Kurve fahren. Das Differenzial ist ein in das Endantriebszahnrad integriertes Spezialgetriebe, das zwischen den Antriebsrädern platziert ist, um dieses Problem zu lösen.

Das Schaubild oben rechts veranschaulicht die Arbeitsweise. Die Motorleistung wird über das Endantriebszahnrad auf den Differenzialkorb übertragen. Am Differenzialkorb sitzen zwei Ausgleichskegelräder, die die beiden benachbarten Antriebskegelräder antreiben – diese übertragen dann die Leistung links und rechts an die Räder.

Bewegt sich das Auto geradeaus, treibt die Rotation des Endantriebszahnrades den Differenzialkorb und damit die Ausgleichskegelräder an, die die Leistung gleichmäßig auf beide Antriebskegelräder übertragen – hier drehen sich das linke und das rechte Rad gleich schnell.

Bei Kurvenfahrten jedoch erzeugt das Rad auf der Kurveninnenseite einen Widerstand, der auf das entsprechende Antriebskegelrad übertragen wird. Sobald dies geschieht, beginnen die Ausgleichskegelräder (die sich zusammen mit den Antriebskegelrädern bewegt haben, ohne sich selbst zu drehen), sich zu drehen und ermöglichen auf diese Weise eine unterschiedliche Rotationsgeschwindigkeit zwischen dem linken und dem rechten Rad.

Das bedeutet, dass geringfügig weniger Leistung an das Rad übertragen wird, das auf der Kurveninnenseite auf Widerstand trifft – und geringfügig mehr an das Rad, das an der Außenseite den längeren Weg absolvieren muss. Auf diese Weise dreht sich jedes Rad mit der für die Kurvenfahrt optimalen Geschwindigkeit.

Sanfte, stabile Kurvenfahrten

Sperrdifferenzial

Bei Kurvenfahrten hat das Differenzial einen Nachteil. Wenn ein Antriebsrad komplett den Kontakt zur Straßenoberfläche verliert, erhält das andere Rad keine Antriebskraft, und das Rad, das keinen Bodenkontakt mehr hat, dreht sich unkontrolliert. Das geschieht, weil das Differenzial immer versucht, den Rotationsunterschied auszugleichen, indem es die gesamte Antriebskraft an dieses eine Rad überträgt. Dieses Phänomen kann auch bei Autos beobachtet werden, die in Eis oder Schnee stecken bleiben. Der völlige Verlust an Traktion an einem der Räder sorgt dafür, dass sich das Rad wirkungslos dreht.

Ein Sperrdifferenzial ist ein System, das erfunden wurde, um die Funktion des Differenzials zu unterdrücken, wenn der Unterschied in der Rotationsgeschwindigkeit des linken und des rechten Antriebsrads einen gewissen Punkt überschreitet. Das Sperrdifferenzial soll gewährleisten, dass die optimale Antriebskraft unter den Antriebsrädern verteilt wird, indem der Unterschied der Umdrehungsgeschwindigkeit zwischen den beiden Antriebskegelrädern begrenzt wird. Dies kann auf mehrere Arten geschehen – einschließlich Mehrkupplungssysteme, elektrisch gesteuerter Systeme und Systeme, die auf dem Prinzip der Reibung in viskosen Flüssigkeiten arbeiten.

In Sportwagen werden Sperrdifferenziale weniger verwendet, um Schlamm oder Schnee zu überwinden, sondern um die effektive Umsetzung der Antriebskraft zu garantieren und das Handling zu verbessern.

Das innere Rad steigt hoch.

Antriebskraft wird auf ein in der Luft wirkungslos durchdrehendes Rad verschwendet.

Das innere Rad steigt hoch.

Der Bewegungsunterschied zwischen dem linken und dem rechten Rad ist begrenzt, also wird immer noch Drehmoment an das äußere Rad übertragen.

Sperrdifferenzialtypen

Drehmomentfühlender Typ

Dieses System verwendet speziell entwickelte Zahnräder. Tritt ein Drehmomentunterschied zwischen dem linken und rechten Rad auf, wird der Widerstand zwischen diesen Zahnrädern erhöht, wodurch der Unterschied begrenzt wird. Da dieses System den Geschwindigkeitsunterschied der Antriebsräder strikt limitieren kann, ist es in anspruchsvollen Situationen (wie z. B. Fahrten auf der Rennstrecke) äußerst effektiv – außerdem ist seine Reaktionszeit sehr kurz. Es gibt diverse Typen drehmomentfühlender Sperrdifferenziale wie zum Beispiel Lamellen-, Torsen- und Helical-Sperrdifferenziale.

Geschwindigkeitsfühlender Typ

Diese Systeme beschränken das Differenzial in der Regel mithilfe eines äußerst viskosen Silikonöls statt über Zahnräder. Das gebräuchlichste System dieses Typs ist das Visco-Sperrdifferenzial, das die Scherstabilität des Öls nutzt, aber es gibt auch Systeme, die sich den Widerstand von Öl zunutze machen, das durch kleine Öffnungen fließen muss. Systeme dieser Art können die Bewegung nicht so gut begrenzen wie drehmomentfühlende Systeme und ihr Ansprechverhalten ist nicht so gut, aber auf Oberflächen mit geringer Traktion sind sie leichter zu kontrollieren.

Elektronisch gesteuerter Typ

Elektronisch gesteuerte Systeme, die mithilfe eines Computers Informationen verschiedener Sensoren sammeln und vergleichen und die Rotationsunterschiede der Antriebsräder steuern. Viele Wettkampffahrzeuge (vor allem Rallyeautos in der WRC) nutzen diese Systeme, die auch schon in Serienfahrzeugen zum Einsatz kommen. Die Begrenzung des Differenzials wird über den Druck von Kupplungsscheiben kontrolliert, wobei vor allem hydraulische und elektromagnetische Kupplungen verwendet werden.

KAROSSERIE

KAPITEL 02 Mechanik

Der Rahmen, der alles hält

Form und Konstruktion der Karosserie eines Autos haben eine ebenso große Auswirkung auf seine Leistung wie der Motor und das Getriebe. Das ist die Grundlage, die über die Kontrollierbarkeit entscheidet.

Karosserieanforderungen

Gemeinsam mit dem Motor und dem Fahrwerk bildet die Karosserie das Grundgerüst, das das Fahrzeugverhalten festlegt. Die erstrebenswertesten Eigenschaften für die Karosserie eines Autos sind Verwindungssteifigkeit, Stabilität und, wenn diese Anforderungen erfüllt sind, eine leichtgewichtige Konstruktion. Zum besseren Verständnis der Begriffe „Verwindungssteifigkeit" und „Stabilität" könnte man auch „Widerstandsfähigkeit gegen Verbiegen" und „Widerstandsfähigkeit gegen Brüche" sagen.

Die Verwindungssteifigkeit hat einen besonders großen Einfluss auf die Fahrleistung. Eine verwindungssteife Karosserie verbiegt sich nicht und verändert nicht ihre Form, wenn zum Beispiel die Ladung zunimmt oder bei Fahrten über holprige Straßen oder bei Kurvenfahrten die Last verschoben wird.

Sollte sich die Karosserieform dennoch verändern, muss sie sofort wieder ihre ursprüngliche Form annehmen, sodass das Fahrwerk normal arbeiten kann und die Reifen weiterhin die Bodenhaftung behalten. Je steifer die Karosserie eines Autos, desto leichter kann die Motorleistung auf die Straßenoberfläche übertragen werden und desto berechenbarer ist sein Fahrverhalten und umso leichter lässt sich das Auto fahren. Wenn sich im Gegensatz dazu die Form der Karosserie ohne großen Kraftaufwand verformt, ist es schwerer, die Leistung auf die Straße zu bringen, und die Manövrierbarkeit wird stark beeinträchtigt.

Die Kräfte, die auf die Karosserie eines Autos einwirken, sind nicht konstant. Es gibt langsame und graduelle Effekte und jene, die plötzlich und gewaltsam auftreten. In Werbebroschüren wird der Karosserie eines Autos oft eine gute Verwindungssteifigkeit bei Kurvenfahrten oder einwirkenden Torsionskräften zugeschrieben, aber das bezieht sich in der Regel nur auf langsam auftretende Kräfte. Eine wirklich verwindungssteife Karosserie sollte auch ein plötzliches Auftreten der Kräfte, die auf sie einwirken können, aushalten.

Die Stabilität kann man sich auch als die Belastbarkeit des Autos vorstellen. Ein Fahrzeug mit einer geringen Stabilität nimmt bei einem Aufprall mehr Schaden. Es geht jedoch nicht nur um Schadensminimierung – ein Auto mit einer großen Stabilität muss so gebaut sein, dass die Erschütterung bei einem Aufprall nicht auf die Passagiere übertragen wird.

Idealerweise sollte die Karosserie eines Autos ausgewogen stabil und verwindungssteif sein. Der einfachste Weg, beide Eigenschaften zu verbessern, ist eine Verstärkung, aber dann ist eine Gewichtszunahme unausweichlich. Das ist der Hauptgrund dafür, dass Cabriolets schwerer sind als Autos mit Dach, weil ihre Böden verstärkt werden.

Stabilität und Verwindungssteifigkeit

Nicht-selbsttragende Karosserie

Bei nicht-selbsttragenden Karosserien werden Motor, Getriebe, Aufhängung usw. an einem Rahmen befestigt, bevor eine separat hergestellte Karosserie aufgesetzt wird. Es gibt zahlreiche Rahmen-Designs, einschließlich Leiter-, Zentralrohr-, Kasten- und Plattformrahmen. Leiterrahmen sind jedoch die preiswertesten und am leichtesten zu stabilisieren, weshalb sie (vor allem in Geländefahrzeugen) am häufigsten verwendet werden. Ein weiterer Typ einer nicht-selbsttragenden Karosserie wird hergestellt, indem zahlreiche kleine Rohre miteinander verschweißt werden, die einen Rahmen bilden, an den Karosseriebleche angebracht werden können. Ein solcher Multirohr-Rahmen kann nach der Montage nicht mehr auseinandergenommen werden. Mit einem derartigen Rahmen lässt sich jedoch leicht eine äußerst verwindungssteife und leichtgewichtige Karosserie erreichen und Anpassungen und Reparaturen sind vergleichsweise einfach. Deshalb ist diese Konstruktion bei Rennwagen oder Seriensportwagen mit geringer Stückzahl oft vorzufinden.

Monocoque-Karosserie

Der gebräuchlichste Karosserietyp in modernen Fahrzeugen, bei dem Karosserie und Rahmen kombiniert werden. Die Stabilität der Karosserie wird durch die Kombination der Karosseriekomponenten erreicht, und die Karosserie selbst ist leicht und verwindungssteif. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass die Bodenhöhe reduziert werden kann und dass die Monocoque-Karosserie mögliche Aufprallenergie exzellent absorbiert. Die Tatsache, dass Motor und Fahrwerk direkt an der Karosserie angebracht werden, sorgte anfänglich für Probleme bei Fahrkomfort und -geräusch, aber aufgrund der Fortschritte auf dem Gebiet der Fahrwerkstechnologie und der Motorbefestigung gehören diese Probleme der Vergangenheit an.

Wärmetauscher, die die Geschwindigkeit reduzieren

Die Bremsen eines Fahrzeugs wandeln Fahrenergie in Wärmeenergie um, um das Fahrzeug abzubremsen. Diese essenziellen Komponenten müssen nicht nur Bremskraft erzeugen – sie müssen auch effektiv Wärme abgeben können.

Konstruktion und Prinzip

Die Bremsen eines Fahrzeugs wandeln kinetische Energie in Wärmeenergie um, um eine negative Beschleunigung zu erreichen. Die Bremsen sind ebenfalls dafür verantwortlich, dass sich das Auto beim Parken nicht bewegt.

Die Grundkomponenten eines Bremssystems beinhalten ein Steuerungsgerät, das die Eingabe des Fahrers aufnimmt, ein hydraulisches System, das die Eingabe weiterleitet und die eigentliche Bremsvorrichtung. In jüngerer Zeit wurde dieser Prozess durch die Einführung von Steuerungsmechanismen, die die Eingaben des Fahrers (die Bremskraft) verstärken, und durch ABS-Systeme, die verhindern, dass die Räder des Fahrzeugs blockieren, verbessert.

Bremspedal und Bremsen sind über eine Hydraulikleitung miteinander verbunden. Da das hydrostatische Gesetz von Blaise Pascal bei einer Hydraulikleitung gilt, ist das Pedal mit einem großen Zylinder verbunden. Der Druck, der in diesem Zylinder entsteht, wird verstärkt und zu den Bremsklötzen oder Bremsbacken geleitet. Die Klötze und Backen bestehen aus reibungsintensiven Materialien und wenn diese gegen die Bremsscheibe oder die Bremstrommel gedrückt werden, wird kinetische Energie in Wärmeenergie umgewandelt, wodurch das Auto abgebremst wird.

Bei der in der Hydraulikleitung verwendeten Flüssigkeit handelt es sich nicht um Öl, sondern um eine spezielle Flüssigkeit für Bremsen. Bremsflüssigkeiten dürfen nicht kochen, wenn sie der Hitze der Bremsen ausgesetzt sind, und es gibt verschiedene Arten Bremsflüssigkeiten mit den unterschiedlichsten Siedepunkten.

Da Autobahnfahrten alltäglich geworden sind, werden für die Vorderbremsen der meisten Straßenwagen anstelle von Trommelbremsen mittlerweile Scheibenbremsen verwendet. In einem Scheibenbremssystem wirkt die Bremskraft über die vom Bremssattel unterstützten Bremsbeläge auf beide Seiten der Bremsscheiben.

Wie andere Fahrzeugkomponenten wurden auch die Scheibenbremsen ständig weiter verbessert und belüftete Bremsscheiben mit optimierten Kühleigenschaften entwickelt. Auch die Technologie der Bremssättel wurde verbessert und die traditionellen Schwimmsättel wurden durch große Hochleistungssättel mit gegenüberliegenden Bremskolben ersetzt.

Bremspedal
Bremskraftverstärker
Hauptzylinder
ABS-Auslöser
Computer
Frontsensor
Hinterer Sensor
Signalpfad
Bremsleitung

Wie kommt ein Auto zum Stillstand?

Scheibenbremsen

Auf beiden Seiten einer Metallscheibe, die sich mit den Rädern dreht, wird Reibung ausgeübt. Der größte Vorteil ist, dass die Scheibenbremsen weniger anfällig für Überhitzung sind, da die meisten der Komponenten, einschließlich der Bremsscheibe selbst, den Elementen frei ausgesetzt sind und sie in der Regel eine exzellente Belüftung und Wärmeableitung bieten. Ein weiterer Vorteil der Scheibenbremsen ist die Tatsache, dass sie, wenn sie nass werden, durch die Drehung des Rades auf natürliche Weise vom Wasser befreit werden und es nicht zu größeren Reibungsverlusten kommt. Es ist leichter, die Bremsen über das Bremspedal mit Gefühl zu kontrollieren, aber die Bremsen verstärken ihre eigene Bremskraft im Gegensatz zu Trommelbremsen nicht. Zudem ist die Haltekapazität beim Parken nicht so hoch wie bei Trommelbremsen.

Trommelbremsen

Das Bremsen erfolgt durch das Drücken der Bremsbacken gegen die Innenseite einer zylindrischen Trommel, die sich mit den Rädern dreht. Die Wärmeableitung ist schlecht und eine Überhitzung tritt sehr viel schneller auf als bei Scheibenbremsen. Auch wenn Wasser eindringt, dauert es länger, bis die Reibung wieder gewährleistet ist. Beim Bremsen jedoch zieht die Rotation der Trommel die Bremsbacken automatisch gegen die Reibeoberfläche, wodurch die Bremsbacken stärker greifen und zusätzliche Bremskraft erzeugen. Personenkraftwagen werden in der Regel an den Hinterrädern, die beim Bremsen weniger belastet werden, mit Trommelbremsen ausgerüstet. Bei größeren Fahrzeugen werden Trommelbremsen oft innerhalb der Scheibenbremsen an den Hinterrädern montiert und fungieren als Handbremse.

Bremsprobleme aufgrund von Überhitzung

Bremsschwund

Bremsschwund ist eine Reduktion der Bremskraft, die durch den übermäßigen Einsatz der Bremsen ausgelöst wird. Die Bremsbeläge überhitzen und setzen Gase frei, die als eine Art Schmierung die Reibung reduzieren.

Dampfblasenbildung

In diesem Zustand absorbiert die Bremsflüssigkeit die Wärme von sich überhitzenden Bremsbelägen oder Bremsleitungen und kocht – wodurch Luftblasen in der Bremsleitung entstehen. Wird das Bremspedal getreten, kann der Druck nicht effektiv über die Flüssigkeit übertragen werden, und im schlimmsten Fall funktionieren die Bremsen nicht vollständig.

Bremsscheibentypen

Solide Scheiben

Die elementarste Variante der Scheibenbremse besteht aus einer einfachen Metallscheibe. Die Wärmeableitung ist zwar schlechter als bei belüfteten Bremsscheiben, aber die niedrigen Herstellungskosten sind ein Grund dafür, dass an den Vorderrädern leichter Autos (bei allradgetriebenen Fahrzeugen auch an den Hinterrädern, an denen die Bremslast relativ gering ist) häufig solide Bremsscheiben zum Einsatz kommen. Sämtliche Bremsscheiben, einschließlich belüfteter Bremsscheiben, müssen Reibungshitze widerstehen und die Wärme gut ableiten können. Deshalb wird die überwiegende Mehrheit aus Gusseisen hergestellt.

Belüftete Scheiben

Zwei Bremsscheiben werden geschichtet, mit Löchern im Zwischenraum für die Belüftung. Dieser Typ wurde ursprünglich für Rennwagen entwickelt, ist jedoch mittlerweile auch in Personenkraftwagen gebräuchlich. Im Vergleich zu soliden Bremsscheiben wird die Oberflächentemperatur um rund 30 % reduziert, was das Bremsschwundrisiko verringert und die Lebensdauer der Bremsbeläge erhöht. Ein Nachteil ist, dass ihr Gewicht aufgrund ihrer doppelten Bauweise geringfügig höher ist.

Moderne belüftete Bremsscheibentypen

Gelochte Bremsscheiben

Entspricht einer belüfteten Bremsscheibe, es werden jedoch zusätzliche Löcher auf der Scheibenoberfläche gebohrt, um Wärmeableitung und Kühlung zu verbessern. Sie kommen oft in Rennwagen und Hochleistungssportwagen zum Einsatz. Die Löcher sorgen auch effektiv für die Beseitigung von Bremsstaub, der beim Bremsen entsteht. Bei einem weiteren Bremsscheibentyp, der „gerillten Bremsscheibe", wird die Oberfläche mit Rillen versehen, die den gleichen Effekt haben sollen.

Innenbelüftete Bremsscheiben

Zwei Scheiben werden mithilfe von wärmeleitenden Rippen geschichtet, die in Spiralform zwischen den Scheiben verlaufen. Diese Rippen werden nach den Erkenntnissen über Luftströme in der Scheibe entwickelt und sollen den Luftstrom durch die Scheibe maximieren. Dadurch wird die Wärme bei sich drehenden Rädern extrem effizient abgeleitet. Diese Scheiben kommen in Hochleistungssportwagen und schweren, leistungsstarken Limousinen zum Einsatz.

Bremsscheiben und -sättel

Bremssatteltypen

Schwimmend

Ein schwimmender Bremssattel verfügt nur über einen auf einer Seite montierten Kolben, der den Bremsklotz bei Druck auf das Bremspedal gegen die Bremsscheibe drückt. Die Gegenkraft drückt den gegenüberliegenden Bremsklotz gegen die andere Seite der Bremsscheibe. Der Kontakt zwischen Bremsklötzen und Scheibe wird ständig angepasst, und es gibt keine Zeitverzögerungen zwischen den Einsätzen der beiden Klötze. Auf diese Weise wird ein sanftes, gleichmäßiges Bremsgefühl ermöglicht. Der Bremssattel selbst ist klein und leicht und bietet trotzdem genug Bremskraft – selbst wenn sich die Scheibe aufgrund der Hitze verkrümmt. Sie verlieren in manchen Rennsituationen zwar leicht an Wirkung, sind aber für den normalen Fahreinsatz mehr als ausreichend.

Gegenkolben

Bei diesem Setup befinden sich auf beiden Seiten der Bremsscheibe Bremskolben, die die Bremsbeläge von beiden Seiten gegen die Scheibe drücken. Da die Bremssättel bei diesem Setup größer und schwerer sind, müssen sie eigentlich aus Aluminium gefertigt werden. Das könnte jedoch schnell auf Kosten der Stabilität gehen, weshalb man sie sorgfältig konstruieren muss. Das Setup ist in Streckenrennen sehr effektiv, aber um sein Potenzial richtig ausschöpfen zu können, müssen die Bremsscheiben auch schwimmend montiert werden. Standardbremsscheiben können sich wegen der Hitze verbiegen und dann in einem Winkel liegen, bei dem die Beläge nicht mehr effektiv auf die Scheiben einwirken können. Mit der wachsenden Popularität größerer Bremsen werden Bremsen mit mehreren Kolben (vier oder sechs) und größerer Bremsbelagfläche in Serienfahrzeugen eingesetzt. Riesige Gegenkolben-Bremssättel, die hinter den Leichtmetallrädern zu sehen sind, sind ein klarer Hinweis darauf, dass man es mit einem Hochleistungssportwagen zu tun hat.

AUFHÄNGUNG

KAPITEL 02 Mechanik

Stoßdämpfer zur Kontrolle der Karosseriebewegungen

Einfederung und Ausfederung erscheinen auf den ersten Blick als simple Vorgänge, aber ohne ein entsprechendes Aufhängungssystem können Sie mit dem Auto nicht geradeaus fahren und es erst recht nicht adäquat kontrollieren.

Konstruktion und Prinzip

Die Aufhängung (bzw. das Fahrwerk) ist der zwischen Karosserie und Rädern positionierte Mechanismus, der die Stöße, die auf die Räder einwirken, absorbieren und gleichzeitig das Gewicht des Fahrzeugs tragen muss. Außerdem hat sie einen wesentlichen Einfluss auf das Handling und muss deshalb als zentraler Bestandteil der Fahrzeugkonstruktion angesehen werden.

Aufhängungen werden in aller Regel unterteilt in „abhängige" Aufhängungssysteme, bei denen die Bewegung des einen Rads Einfluss auf das gegenüberliegende Rad hat, und „unabhängige" Aufhängungssysteme, bei denen sich die Räder auf der linken und der rechten Seite unabhängig voneinander bewegen, ohne einander zu beeinflussen. Beispiele für abhängige Aufhängungen sind Starrachsen-, Längslenker- und Drehstabfederung. Zu den unabhängigen Einzelradaufhängungen gehören Federbeine und Doppelquerlenker.

Das Fahrwerk selbst besteht aus Federn, Stoßdämpfern und Gelenken. Die Federn absorbieren den Stoß von der Straßenoberfläche, während die Stoßdämpfer die Vibration der Federn unterdrücken, um Fahrkomfort und Stabilität zu gewährleisten. Die Gelenke beschränken die Radbewegungen und sorgen dafür, dass die Räder optimalen Kontakt mit der Fahrbahnoberfläche haben. Dem Aufhängungssystem kommt die wichtige Aufgabe zu, die Reifen über die Federn auf die Fahrbahnoberfläche zu drücken und ihre Ausrichtung zu regulieren.

Die Illustration zeigt eine Aufhängung mit Federbeinen. In Japan kam dieses System erstmalig im Toyota Corolla zum Einsatz – heute ist dieser Aufhängungstyp bei Serienfahrzeugen jedoch äußerst verbreitet. Beim Federbein-Aufhängungssystem ersetzt der Federbeindom den oberen Arm der Doppelquerlenker-Aufhängung und übernimmt dessen Aufgaben. Dadurch wird die Zahl der notwendigen Komponenten reduziert und es bleibt mehr Raum für den Motor.

Beispiel einer Federbeinaufhängung

Volle Kontrolle beim Fahren, bei Kurvenfahrten und beim Anhalten

Federn

Die Federn absorbieren die vom Auto während der Fahrt empfangenen Stöße und reduzieren auf diese Weise nicht nur Erschütterung, sondern sorgen dafür, dass das Auto einen konstanten Bodenabstand hat. Neben der Kontrollierbarkeit des Autos spielen die Federn auch für das Handling und die Stabilität eine wichtige Rolle. Es ist keine Übertreibung, zu sagen, dass die Einstellung der Federn allein einen großen Einfluss auf die Leistung eines Autos haben kann. Am weitesten verbreitet sind Schraubenfedern aus Metall, es kommen jedoch auch luftdruckregulierte Pneumatik-Fahrwerke zum Einsatz.

Stoßdämpfer

Eine Schraubenfeder kann Stöße absorbieren, wenn Gewicht auf sie einwirkt, aber danach wird sie immer weiter auf- und abspringen. An dieser Stelle kommen die Stoßdämpfer ins Spiel, die diese Bewegungen „abdämpfen". Die gebräuchlichsten Stoßdämpfer nutzen den Widerstand, der von einem in Öl und Gas gelagerten Kolben erzeugt wird. Die langsamere Vor-und-Zurück-Bewegung absorbiert die heftigeren vertikalen Federbewegungen. Stoßdämpfer haben einen ebenso großen Einfluss auf Kontrolle und Stabilität wie die Federn.

Querlenker

Die Querlenker sind die Teile, die die Bewegungen des Rads kontrollieren. Sie sind über Buchsen mit Karosserie und Radträger verbunden. Es gibt verschiedene Querlenker-Typen wie z. B. Dreiecksquerlenker und Doppelquerlenker. Sie bestehen in der Regel aus gepresstem Stahl, aber in einigen Sportmodellen kommt aus Gewichtsgründen oft auch Aluminium zum Einsatz. Bei Aufhängungssystemen mit Doppelarm, etwa bei der Doppelquerlenker-Aufhängung, spricht man von einem oberen und einem unteren Arm.

Stabilisatoren/Querstreben

Ein Stabilisator (oder eine Querstrebe) ist ein Stabilisierungselement, das dazu beiträgt, die Wankbewegungen eines Fahrzeugs mithilfe einer Drehstabfederung zu reduzieren. Er ist mit beiden Enden des unteren Querlenkers verbunden und reagiert nur auf ungleichmäßige Bewegungen der Aufhängung auf der linken und der rechten Seite. Bei Kurvenfahrten zum Beispiel bewegt sich die Außenseite eines Autos nach unten und die Innenseite nach oben. Der Stabilisator versucht, diese Bewegung zu unterdrücken, damit es nicht zu Wankbewegungen kommt und das Auto stabil bleibt. So können Stabilisatoren dazu verwendet werden, das Über- und Untersteuern eines Autos zu verhindern.

Fahrwerkbuchsen

Fahrwerkbuchsen sind stoßabsorbierende Materialien, die an Schnittstellen zwischen den Metallgelenken und den Armen der Aufhängung platziert sind, oder an anderen Befestigungsstellen der Karosserie. Wenn die Buchsen zu weich sind, werden sie sich bei der Wirkung großer Lasten, etwa bei Kurvenfahrten, verformen. Das würde zu ungewünschten Bewegungen der Aufhängung führen, die die Kontrolle über das Auto erschweren und die Stabilität des Wagens beeinträchtigen. Daher werden die Buchsen in der Regel aus einem Gummimaterial mit sehr guten stoßabsorbierenden Eigenschaften gefertigt. In Rennwagen werden häufig kugelförmige „Pillow Ball"-Metallgelenke verwendet, damit die Aufhängung sich mit höchstmöglicher Präzision bewegt. Die Fahrwerksbuchsen sind wichtige Komponenten, die die Leistung der Federn und Stoßdämpfer garantieren.

Typen der Radaufhängung

Obgleich alle Arten der Radaufhängung dieselben Grundfunktionen zum Erhalt des Bodenabstandes und dem Auffangen von Unebenheiten und Lastwechseln während der Fahrt erfüllen, besitzt jeder Typ ganz bestimmte Eigenschaften. Diese Eigenschaften haben Einfluss auf die Fahrleistung, etwa im Bereich der Kurvenfahrten, der Kontrolle über das Auto (was ein Sicherheitsfaktor ist) und sogar des Fahrkomforts.

Radaufhängungssysteme werden fortlaufend verbessert und neu entwickelt. Ein kompliziertes System ist nicht unbedingt auch ein besseres, doch die Notwendigkeit, Schlaglöcher und Fahrbahnunebenheiten unmittelbar auszugleichen und den ununterbrochenen Bodenkontakt der Reifen zu erhalten, hat zu immer komplexeren Lösungen geführt.

Starrachse

Bei einer Radaufhängung mit Starrachse sind die Räder auf der linken und rechten Seite jeweils durch eine Achse miteinander verbunden. Demzufolge wirken sich Bewegungen auf der einen Seite zwangsläufig auch auf die andere aus, was schneller zum Verlust der Bodenhaftung führen kann. Achskörper und Achsgehäuse sind schwer und erhöhen die ungefederte Masse des Autos. Doch aufgrund der günstigen Produktionskosten und der hohen Stabilität dieser Aufhängungsart findet die Starrachsenaufhängung oftmals als Hinterradaufhängung bei weniger teuren Fahrzeugen mit Heckantrieb Verwendung.

Einzelradaufhängung

Bei der Einzelradaufhängung können sich das linke und das rechte Rad unabhängig voneinander auf und ab bewegen, was für ausgezeichnetes Fahrverhalten bei Straßenunebenheiten oder Schlaglöchern sorgt. Bei Autos mit Heckantrieb wird zudem die Kraft effizient auf die linken und rechten Räder übertragen. Ein leichtes, stabiles System mit großem Fahrkomfort.

Einzelradaufhängung – die beste Wahl bei Sportwagen

McPherson-Federbein

Ein einfaches Aufhängungssystem mit einer Feder, einem Stoßdämpfer und einem unteren Querlenker. „Federbein" bezieht sich auf den Dämpfer selbst, der bei dieser Art der Aufhängung auch eine stützende Funktion hat. Der obere Teil trägt die Karosserie mittels eines Gummipuffers und der untere Teil des Stoßdämpfers wird vom unteren Querlenker unterstützt. Die geringe Anzahl von Bauteilen sorgt für geringes Gewicht und eine gute Länge des Kolbenhubs, weshalb Vibrationen größtenteils abgefangen werden können. Entwickelt wurde das System von Earle S. MacPherson, dem es auch seinen Namen verdankt.

Doppelquerlenker-Aufhängung

Bei diesem Modell hängen die Räder an zwei meist in V-Form angeordneten, miteinander verbundenen Querlenkern, einem oberen und einem unteren. Je nach Form der Querlenker und Layout des Wagens kann diese Aufhängung Abweichungen in Ausrichtung und Position des Fahrzeugs beim Beschleunigen relativ leicht ausgleichen. Sie ist außerdem sehr starr und erfreut sich darum großer Beliebtheit bei Sportwagen, die viel Wert auf gute Kontrolle und Stabilität legen. Allerdings ist die Konstruktion sehr komplex, besteht aus vielen Bauteilen und nimmt viel Platz ein.

Mehrlenkerachse

Hierbei handelt es sich um ein hochentwickeltes Doppelquerlenkersystem, bei dem die Achse an drei bis fünf Lenkern hängt. Jeder dieser Lenker arbeitet für sich, was ihnen viel Bewegungsfreiheit gibt und unter anderem sehr spezifische Einstellungen möglich macht. Die höhere Anzahl von Lenkern sorgt für Bewegungsfreiheit in viele Richtungen und dauerhaft guten Bodenkontakt der Reifen. Diese Art der Aufhängung wird oft als Hinterradaufhängung bei frontgetriebenen Hochleistungsautos eingesetzt, um die Stabilität bei hohen Geschwindigkeiten zu erhalten, sowie in leistungsstarken Autos mit Heckantrieb zum Erhalt der Traktion.

Die Merkmale der unterschiedlichen Aufhängungstypen

Spureinstellung

Sehen Sie sich einmal ein Möbelstück an, das Räder besitzt. Wenn Sie geradewegs von oben draufschauen, sehen Sie, dass die Radachse in leichtem Winkel zu der Achse steht, die das Rad mit dem Möbelstück verbindet. Diese leichte Achsverschiebung sorgt dafür, dass sich das Rad beim Schieben in einer geraden Linie bewegt und nicht schlenkert.

Stellen Sie sich jetzt einen Autoreifen vor, der über den Boden gerollt wird. Wenn Sie das Rad aufrecht hinstellen und es rollen, bewegt es sich in einer geraden Linie, doch wenn Sie es ganz leicht neigen, bewegt es sich beim Rollen in die Richtung der Neigung.

Daran sehen wir, dass die Räder an einem Auto sich dann in die für die aktuelle Fahrtrichtung des Autos passende Richtung bewegen, wenn sie in den richtigen Winkel gebracht werden. Das ist der Gedanke hinter der Spureinstellung (oder Achsgeometrie).

Sowohl beim Fahren und Lenken als auch beim Bremsen ist es wichtig, dass die Räder korrekt eingestellt sind. Diese „Positionierung" der Räder kann für eine bestmögliche Nutzung der Reifen sorgen und die Eigenschaften eines Autos beeinflussen.

Auf der gegenüberliegenden Seite sehen Sie die vier grundlegenden Winkel der Spureinstellung: Der Spurwinkel ist der Winkel der Reifen, wenn man von oben auf sie herabschaut, der Nachlaufwinkel der Aufhängung wird beim Blick von der Seite erkennbar, der Radsturz der Räder beim Blick von vorne und der Spreizungswinkel ist der Winkel zwischen Aufhängung und Rad von vorne betrachtet. Diese Einstellungen werden in winzigen Schritten von 0,1 Grad/0,1 mm vorgenommen, sodass es kaum Fehlerspielraum gibt. Wenn ein Fehler gemacht wird, fährt das Auto möglicherweise nicht in einer geraden Linie oder das Handling wird erschwert. Darum sollten Sie unbedingt die unterschiedlichen Auswirkungen dieser Einstellungen kennen.

Der Radwinkel beeinflusst Bodenkontakt und Handling

Spurwinkel

Das ist der Winkel der rechten und linken Räder einer Achse, wenn man von oben auf das Auto schaut. Stehen die Räder vorn weiter auseinander, spricht man von „Nachspur", stehen sie vorn näher zusammen, spricht man von „Vorspur". Dieser Winkel hat großen Einfluss auf die Vorwärtsbewegung des Autos und führt, wenn er zu groß ist, zu ungleichmäßiger Abnutzung der Reifen.

Nachlaufwinkel

Das ist der Winkel zwischen der Vorderradaufhängung und den Vorderrädern, wenn man die Räder von der Seite betrachtet. Mit ihm wird die seitliche Schwingung des Rads bestimmt und er beeinflusst auch das Rückstellmoment (die Kraft, die das Rad beim Einschlagen des Lenkrads wieder in Geradeausstellung zieht). Weicht der Nachlaufwinkel der Räder auf der rechten von dem auf der linken Seite ab, zieht das Auto in die Richtung des flacheren Winkels oder die Lenkung zieht beim Bremsen zu einer Seite.

Radsturz

Das ist der Neigungswinkel der Räder zur Fahrbahn, wenn man das Fahrzeug von vorn betrachtet. Zeigt die Oberseite der Räder nach innen, spricht man von negativem Sturz. Zeigt sie nach außen, spricht man von positivem Sturz. Die meisten Autos nutzen einen leicht positiven Sturz, um schweren Belastungen entgegenzuwirken.

Spreizungswinkel

Das ist der Winkel der Radträgerachse, wenn man das Fahrzeug von vorn betrachtet. Im Normalfall wird er so eingestellt, dass bei Veränderungen im Straßenbelag dem Fahrer das Lenkrad nicht aus der Hand gerissen wird, doch er kann auch das Geradeausfahren, das Rücklaufmoment und die Lenkkraft beeinflussen.

Reifen

KAPITEL 02 Mechanik

Das Bindeglied zwischen Fahrzeug und Straße

Nachdem sie das Antriebssystem und die Radaufhängung passiert hat, wird die Schubkraft des Motors letztendlich über die Räder auf die Straße übertragen. Ganz gleich, wie gut ein Auto ist, seine Leistung ist immer nur so gut wie seine Reifen.

Hochleistungsreifen

Reifeneigenschaften lassen sich grob in vier Kategorien unterteilen: Lastausgleich, Stoßdämpfung, Beschleunigung und Bremsen sowie Fahrspurerhalt beim Geradeausfahren und bei Kurvenfahrten. Sobald eine gute Balance zwischen diesen vier Grundfunktionen erreicht wurde, werden die Reifen entsprechend der spezifischen Bedürfnisse feingetunt.

Bei Sportwagen kommen bevorzugt Reifen mit guten Beschleunigungs-, Abbrems- und Fahrspureigenschaften zum Einsatz, um gutes Fahr-, Lenk- und Bremsverhalten zu gewährleisten. Diese Reifen bestehen aus stark haftendem Gummi, der gut an der Fahrbahn haftet, und sind sehr hart, damit sie bei Belastung nicht ihre Form verändern. Das sorgt für bessere Lenkreaktionen bei Kurvenmanövern, sodass Kurven mit höheren Geschwindigkeiten genommen werden können.

Natürlich haben stark haftende Reifen auch Nachteile. Zwar bieten sie bei Kurvenmanövern eine große Bodenhaftungskapazität, allerdings wird der Rücklauf erschwert, wenn diese Kapazität überschritten wird, und es bedarf guter fahrerischer Fähigkeiten. Aufgrund der starken Haftung können solche Reifen die Belastungsmenge für Aufhängung und Karosserie erhöhen und die Wankbewegung beim Kurvenfahren verstärken. Die Reifen sind so leistungsstark, dass sie das Auto aus dem Gleichgewicht bringen können, was bedeutet, dass das Auto selbst leistungsstark genug sein muss, um diese Reifen überhaupt einsetzen zu können. Sie sollten auch nicht vergessen, dass wegen der großen Reibung zwischen Reifen und Straße sich die Reifen schneller abnutzen, der Fahrkomfort beeinträchtigt wird und es zu lauten Fahrgeräuschen kommt.

Die Haftung auf nassen Straßen hängt im Wesentlichen vom Reifenprofil ab. Die Rillen leiten das Wasser ab, das der Reifen von der Straße aufnimmt, reduzieren aber die Steifigkeit des Reifens. Es ist schwierig, ein ausgeglichenes Verhältnis zu finden, besonders bei Sportreifen.

Ein Auto ist nur so gut wie seine Reifen und aus diesem Grund muss ein Fahrer Leistungsfähigkeit und Eigenschaften der Reifen genau kennen, um den richtigen Reifen für sich auswählen zu können.

Bodenhaftung und Härte – der Schlüssel zu schnellem Fahren

Laufflächenmaterial

Dies ist das Gummi der Reifenlauffläche, das Kontakt zur Straße hat. Das weiche Gummi von Hochleistungsreifen sorgt für eine starke Bodenhaftung, verschleißt aber schneller. Reifen für normale Autos bieten Bodenhaftung nur bis zu einem gewissen Grad und verwenden eine härtere Mischung, um die Haltbarkeit zu erhöhen. Reifen sind normalerweise hart und zeigen ihr volles Haftungspotenzial erst ab einer bestimmten Reifentemperatur. Wenn sie aber überhitzen, verringert sich ihre Haftung.

Laufflächenprofil

Dies ist das Rillenmuster in dem Teil der Reifenoberfläche, der Kontakt zur Straße hat. Hauptzweck dieser Rillen ist es, das beim Rollen des Reifens aufgenommene Wasser wieder abzuleiten, und bei vielen Reifen ist das Profilmuster auf eine bestimmte Drehrichtung festgelegt, damit es möglichst viel Wasser ableiten kann. Andererseits verringern solche Profile die Oberflächenhärte der Reifen, weshalb Hochleistungsreifen nur wenige große Rillen statt eines komplexen Musters mit vielen kleinen aufweisen. Es gibt auch asymmetrische Designs mit weniger Rillen an der Reifenaußenseite für mehr Härte beim Kurvenfahren und mehr Rillen an der Innenseite zur Ableitung des Wassers.

Reifenaufbau

Zum Reifenaufbau gehören alle äußeren Teile des Reifens, einschließlich Lauffläche, Seitenwände, Reifenwulst etc. Die Kräfte, die von der Fahrbahnoberfläche auf die Lauffläche wirken, werden an alle diese verschiedenen Teile übertragen, bis sie den Reifenwulst erreichen. Der Reifenaufbau muss hart sein, damit er sich nicht unnötig verzieht, wenn der Reifen starke Belastungen wie beim Beschleunigen, Bremsen und Lenken aushalten muss. Allerdings sinkt mit zunehmender Härte und verbesserter Fahrleistung der Fahrkomfort, weshalb Reifen unter Berücksichtigung ihrer speziellen Eigenschaften und ihres Anwendungsgebiets hergestellt werden.

Längslast

Querlast

Seitenwölbung

RÄDER

KAPITEL 02 Mechanik

Aluminiumräder für die Straße

Verringert man die ungefederte Masse um 1 kg, entspricht dies einer 15-kg-Verringerung der gefederten Masse. Leichtmetallräder helfen dabei, die bestmögliche Leistung beim Beschleunigen, Verlangsamen, Bremsen und bei Kurvenfahrten zu erzielen.

Ungefederte Masse

Obwohl oftmals als ein dekoratives Element angesehen, beeinflussen Aluminiumräder die Fahrleistung entscheidend.

Den größten Schub benötigt ein Auto beim Beschleunigen aus dem Stand. Es erfordert viel Energie, um die Räder aus dem Stand in Bewegung zu setzen, und je schwerer die Räder, desto mehr Energie ist nötig. Leichtere Räder benötigen weniger Energie und folglich auch weniger Motorleistung.

Masse, die nicht von der Aufhängung unterstützt wird, wird als „ungefederte Masse" bezeichnet und beeinflusst die Fahrleistung eines Autos spürbar. Leichte Räder und Reifen verbessern das Verhalten bei der Beschleunigung während der Fahrt und aus dem Stand und die Bremsleistung wird erhöht, da das Anhalten der sich drehenden Räder leichter fällt. Auch ist die Aufhängung weicher, was den Fahrkomfort erhöht und das Fahrverhalten selbst verbessert. Ein weiterer Vorteil ist die Kraftstoffeffizienz.

Die Beliebtheit von Aluminiumrädern bei Sportwagen ist Beweis für ihre Leistungsvorteile. Eine Verringerung der ungefederten Masse um 1 kg entspricht einer Verringerung der gefederten Masse um 15 kg und in der Welt des Motorsports reduziert man die ungefederte Masse manchmal noch weiter, indem man Räder aus Magnesiumlegierung verwendet, die noch leichter sind als Aluräder.

Gewöhnliche Aluminiumräder haben den Vorteil, dass sie die beim Bremsen erzeugte Hitze effizient ableiten können. Auch sind sie weniger rostanfällig als Stahlräder.

Doch man muss vorsichtig sein, wenn man die Räder wechselt, da die größere Radgröße die Gewichtsvorteile des leichteren Materials relativieren kann. Eine Vergrößerung der Räder führt unvermeidlich zu einer Erhöhung der ungefederten Masse, und die Vorteile von Reifen mit geringerem Profil müssen sorgsam gegen die Nachteile dieser Gewichtserhöhung abgewogen werden.

Je leichter die Räder sind, desto mehr verbessert sich die Fähigkeit der Reifen, die Unebenheiten der Straßenoberfläche nachzuzeichnen, was das Auto wiederum gerade hält und die Fahrqualität verbessert.

Das leichtere Gewicht der Räder verringert außerdem Menge an Motorleistung, die erforderlich ist, um das Fahrzeug aus dem Stand zu bewegen.

Arten der Leichtmetallräder

Einteilige

Bei dieser einfachen Konstruktion bestehen Felge und Radscheibe aus einem einzelnen Stück Metall. Nach dem Guss (oder Schmieden) werden die Räder maschinell zurechtgeschnitten, was für hohe Präzision sorgt. Im Bezug auf Design gibt es relativ wenig Spielraum, doch da sie aus einem einzelnen Stück Metall bestehen, sind sie leichter und ausbalancierter als zwei- oder dreiteilige Räder.

Zweiteilige

Radscheibe und Felge werden als zwei Einzelteile hergestellt und dann miteinander verschraubt oder verschweißt. Bei der Herstellung von Scheibe und Felge können unterschiedliche Materialen (Aluminium, Magnesium, Titan etc.) sowie unterschiedliche Herstellungsmethoden (Schmieden oder Guss) eingesetzt werden. Diese Räder haben den Vorteil, dass sie viel Variationsspielraum bei der Entwicklung der Radscheibe sowie bei der Einpresstiefe bieten.

Dreiteilige

Hier werden Vorder- und Rückseite der Felgen miteinander verschweißt und die Radscheibe wird mit Bolzen befestigt. Diese dreiteilige Version besitzt dieselben Vorteile wie die zweiteilige, ist jedoch aufgrund der Bolzen geringfügig schwerer. Allerdings bietet sie noch mehr Variationsmöglichkeiten als die zweiteilige, und bei Rädern, die optischen Ansprüchen genügen sollen, handelt es sich oft um diese Variante.

Herstellungsmethoden

Guss

Bei dieser Methode wird geschmolzenes Aluminium in eine Form gegossen. Bei zwei- und dreiteiligen Rädern ist die große Flexibilität im Hinblick auf das Design der Radscheibe ein Vorteil. Allerdings muss das Material für die nötige Stärke recht dick sein, was den Gewichtsvorteil gegenüber dem Stahlrad wiederum relativiert. Trotzdem ist der Guss aufgrund der geringen Kosten die gängigste Herstellungsmethode für Aluminiumräder.

Schmieden

Ein Metallblock wird mit Tausenden Tonnen Druck gepresst (um die Metallmoleküle in eine Reihe zu bringen), wodurch ein widerstandsfähiges, hartes Material entsteht. Gegenüber dem Guss ist das Metall viel stärker, wodurch die Dicke der Teile reduziert werden kann und die Komponenten leichter werden können. Die größere Stabilität sorgt für eine höhere Zugfestigkeit, zeigt aber Schwächen gegenüber Verbiegungskräften. Zudem ist die Herstellung teurer, und die Designvielfalt ist wegen des Herstellungsprozesses beschränkt. Andere Materialien als Aluminium können verwendet werden und einige Renn- und Sportwagen benutzen noch leichtere, aus Magnesium geschmiedete Räder.

Die vielen Vorteile der Gewichtsreduzierung

Die Wirkung der Luft auf die Karosserie

Das Karosseriedesign hat deutliche Auswirkungen auf die Leistung bei hohen Geschwindigkeiten und verbessert Höchstgeschwindigkeit, Stabilität und Kraftstoffeffizienz. Wenn man das Autodesign behandelt, kommt man ohne den Blick auf die Bedeutung der Aerodynamik nicht aus.

Luftwiderstand und Auftriebskraft

Bei hoher Geschwindigkeit hat der Luftwiderstand gewaltige Auswirkungen und erzeugt manchmal das Gefühl, eine unsichtbare Mauer aus Luft halte das Auto davon ab, noch schneller zu werden.

Sobald ein Auto mehr als 80 km/h erreicht, wird der Luftwiderstand zu einer nicht mehr zu ignorierenden Kraft. Ab diesem Punkt steigt er exponentiell zur Fahrgeschwindigkeit an. Anders ausgedrückt: Verdoppelt das Auto seine Geschwindigkeit, vervierfacht sich der Luftwiderstand, und wenn sich das Tempo verdreifacht, wirkt der neunfache Luftwiderstand auf das Auto. Außerdem muss man den Rollwiderstand der Räder beachten, obwohl dieser Widerstand nicht so problematisch ist, denn wenn die Motorkraft die Luftmauer nicht mehr überwinden kann, ist das die effektive Endgeschwindigkeit des Autos. Bei Renn- und Sportwagen, die Höchstgeschwindigkeiten erreichen und die Leistung im Hochgeschwindigkeitsbereich garantieren müssen, und sogar bei Straßenautos, bei denen maximale Effizienz gefordert ist, spielt die Verringerung des Luftwiderstands eine wichtige Rolle.

Tiefer gelegte Autos bieten weniger Luftwiderstand als höhere, und fließende oder keilförmige Designs, über die die Luft gleichmäßig hinwegströmen kann, sind ebenfalls aerodynamischer. Auch Designs mit glatter Karosserieoberfläche ohne hervorstehende Teile fördern das ungehinderte Hinwegströmen der Luft.

Andererseits muss man sich bewusst machen, dass die meisten aerodynamischen Karosserieformen von der Seite betrachtet Flugzeugflügeln ähneln, und ebenso wie bei den Flügeln strömt die Luft schneller über die Oberseite als über die Unterseite. Dies erzeugt Auftrieb, der wiederum zum Verlust von Bodenhaftung führt. Aber die Unterdrückung von Auftrieb erhöht den Luftwiderstand, und ein wichtiger Aspekt im Prozess des Autodesigns ist die Festlegung des Gleichgewichts zwischen Luftwiderstand und Auftrieb.

Weiterhin muss die Störung der Geradeauslaufstabilität durch Seitenwinde berücksichtigt werden. Eine aerodynamische Karosserie erfordert also die Miteinbeziehung einer absoluten Ausgeglichenheit zwischen Luftwiderstand, Auftrieb und Giermoment.

Stirnfläche

► Frontbereich

Die Silhouette der Karosserie von vorn betrachtet. Je größer dieser Bereich, desto höher der Luftwiderstand. Die Verkleinerung der Stirnfläche oder des Luftwiderstands sind einer der Gründe, weshalb Sportwagen in der Regel flacher gebaut werden. Eine große Frontpartie ist ein Nachteil von kompakteren Autos und Minivans.

Cw-Wert – Strömungswiderstandskoeffizient

► Konstanter Widerstand

Die Zahl, die angibt, wie reibungslos Luft über ein Objekt hinwegströmt. Dies ist ein fester Wert und wird als solcher nicht von der Geschwindigkeit beeinflusst. Der Luftwiderstand errechnet sich aus dem Strömungswiderstandskoeffizienten multipliziert mit dem Frontbereich. Bei einem hohen Cw-Wert und einer kleinen Frontpartie wie bei kleinen Sportwagen ist der Luftwiderstand demzufolge immer noch gering. Das Gegenteil gilt für Limousinen, die eine größere Frontpartie haben.

Ca-Wert – Auftriebsbeiwert

► Konstanter Auftrieb

Diese Zahl steht für die Auftriebskraft, die die Luft beim schnellen Fahren auf ein Auto ausübt. Die entgegengesetzte Kraft wird als „Abtrieb" oder „negativer Auftrieb" bezeichnet. Beim Erzeugen von Abtrieb wird der Luftwiderstand erhöht, und Stabilität ist nur zu erreichen, indem man die optimale Balance zwischen dem vorderen und hinteren Abtrieb findet.

Konstantes Giermoment

► Giermoment

Beim Fahren trifft der Wind das Auto nicht immer direkt von vorn. Die Kraft, die auf die Mitte des Autos wirken und dafür sorgen kann, dass sich ein Auto dreht, wenn Seitenwinde auf das Auto treffen, nennt man „Giermoment". Autos mit kleinem konstantem Giermoment können Seitenwinden widerstehen und im Allgemeinen werden höhere Autos mit einem höher liegenden Schwerpunkt stärker in Mitleidenschaft gezogen.

Einschränkende Faktoren auf die Leistung bei Höchstgeschwindigkeit

A
AG 105
Aktives Kontrollsystem 107
Allradantrieb 93
Auftrieb 124
B
Belüftete Bremsscheiben 110
C
Ca-Wert (Auftriebsbeiwert) 125
CVT (stufenloses Getriebe) 105
Cw-Wert (Strömungswiderstandskoeffizient) 125
D
Dampfblasenbildung 111
Differenzialgetriebe 106
DKG (Doppel-Kupplungs-Getriebe) 105
DOHC (zwei oben liegende Nockenwellen) 96
Doppelquerlenker 114
Drehmomentfühlender Typ (Sperrdifferenzial) 107
Dämpfer 114
E
Einzelradaufhängung 114
Endantriebszahnrad 105
F
Fahrwerksbuchse 115
Feder 114
Federbein 114
Frontmotor/Frontantrieb 92
Frontmotor/Heckantrieb 92
G
Gegenkolben 113
Gelochter Typ 112
Geschmiedet 123
Geschwindigkeitsfühlendes Sperrdifferenzial 107
Gewichtsverteilung 92
Giermoment 125
Gierungsträgheitsmoment 90
Guss 123
H
Heckmotor/Heckantrieb 92
Horizontal gegenüberliegend (Motor) 95
Hubverhältnis 103
Hybridsystem 100
I
Innenbelüfteter Typ 112
K
Karosserie 108
Kompressor 98
L
Lauffläche 120
Laufflächenmaterial 121
Laufflächenprofil 121
Leistungsgewicht 91
M
Mehrlenkerachse 117
Mischhybrid 101
Monocoque-Karosserie 109
MR (Mittelmotor und Heckantrieb) 92
N
Nachlaufwinkel 118
O
OHV 96
P
Paralleler Typ 101
Q
Querlenker 114
R
Radstand 90
Reifenaufbau 121
Reihe 95
S
Scheibentyp 112
Schwimmender Typ 113
Serieller Typ 101
SOHC 96
Solide Scheibe 112
Sperrdifferenzial 107
Spreizungswinkel 118
Spureinstellung 118
Spurwinkel 118
Stabilisator 115
Starrachse 116
Stirnfläche 125
Sturzwinkel 119
T
Traktion 91
Trommelbremse (auflaufende/ablaufende Bremsbackenarten) 111
Trommelbremsentypen 111
Turbolader 97
U
Überhang 90
Unabhängiger Typ 116
Ungefederte Masse 116
V
V-Motor 95
Verdichtungsverhältnis 103
Verwindungssteifigkeit 108
W
W-Motor 95
Wankelmotor 97

Übersicht:
Tuning & Einstellungen

MOTOR

KAPITEL 03 Tuning & Einstellungen

Die Motorleistung verbessern

Wird nur der Motor eines Autos auf maximale Leistung gebracht, ist es schwierig zu handhaben und zeigt auf der Rennstrecke eine schlechte Leistung. Beim Tuning geht es um die optimale Einstellung des Fahrzeugs auf eine bestimmte Rennstrecke und den eigenen Fahrstil.

Feintuning

Der Austausch der Motorsteuerung (ECU – Engine Control Unit) und eine Verbesserung des Auspuffsystems sind die einfachsten ersten Schritte bei der Verbesserung der Motorleistung. Sobald diese Schritte abgeschlossen sind, bilden sie die Basis für weitergehende Modifikationen wie ein mechanisches Tuning oder den Einbau eines Turboladers. Auf diese Weise wird noch nicht unbedingt ein enormer Leistungszuwachs erzielt, aber es werden ruhigere Motordrehungen und ein schnelleres Ansprechverhalten erreicht. Die zusätzliche Belastung des Motors durch diese Anpassungen ist relativ gering – vielmehr werden sie den Motor schützen, wenn er starke Belastungen aushalten muss.

Motorsteuerung (ECU)

Die Aktualisierung der im ROM-Speicher der ECU gespeicherten Motorsteuerungsdaten nennt man „Chiptuning " oder ECU-Tuning. Hier können neben dem Zündzeitpunkt das Kraftstoff-Luft-Verhältnis, die Menge des eingespritzten Kraftstoffs und das Ventil-Timing kalibriert werden. Ein ECU-Tuning ist erforderlich, wann immer Sie den Ladedruck des Turbos erhöhen, Einlass- oder Auspuffsystemkomponenten austauschen oder Modifikationen am Motor selbst vornehmen.

Zündkerzen

Ein starker Zündfunke ist von größter Bedeutung, damit sich das Gemisch aus Kraftstoff und Luft im Brennraum optimal entzündet. Sogar bei einem nicht modifizierten Werksmotor werden die Zündkerzen mit zu viel Hitze belastet, wenn er dauerhaft unter hoher Belastung eingesetzt wird. Deshalb ist es besonders wichtig, die Zündkerzen aufzurüsten, wenn Ihr Motor auf eine größere Leistung getunt wurde. Die gesteigerte Verbrennung des Motors erhöht die Temperatur im Brennraum – dadurch steigt das Risiko einer abnormalen Verbrennung (vorzeitige Zündung). Um dies zu verhindern, muss eine hitzebeständigere Zündkerze mit größerem Hitzetoleranzbereich verwendet werden.

Luftfilter

Die Standardversion des Luftfilters, der verhindern soll, dass Staub und andere Unreinheiten in den Motor gelangen, zeigt einen hohen Widerstand und ist weniger für Motorleistung geeignet. Deshalb ist es besser, einen speziell für den Rennsport entwickelten Luftfilter mit höherem Luftdurchlass einzusetzen. Dies gilt weniger wegen der Steigerung der Motorleistung als wegen der besseren Reaktion beim Beschleunigen und dem verbesserten Ansprechverhalten bei hohen Drehzahlen. Seien Sie jedoch nicht überrascht, wenn das Ansauggeräusch des Motors lauter wird.

Auspuffsystem

Durch die Verringerung des Auspuffwiderstandes lässt sich der Motor schneller hochjagen und die Reaktion bei der Beschleunigung wird spürbar bissiger. Vor allem bei turbogeladenen Motoren, die die Auspuffenergie nutzen, kann nur durch Aufrüsten des Auspufftopfs ein Leistungszuwachs von 10 - 20 % erzielt werden. Sie sollten sich allerdings darüber im Klaren sein, dass eine Änderung der Auspuffkomponenten die Drehmoment-Eigenschaften des Motors verändert. Es ist also immer wichtig, genau vor Augen zu haben, welchen Effekt das Tuning haben soll.

Motoröl

Die einzelnen Komponenten von leistungsstarken Motoren sind enormen Belastungen ausgesetzt (vor allem die Teile im Inneren), deshalb ist ein Hochleistungsmotoröl absolut unverzichtbar. Das Motoröl fungiert als Schmier- und Kühlmittel und als Barriere, um einen luftdichten Zustand zu garantieren. Wenn das Öl die Oberflächen nicht ausreichend abdecken kann, geht der Druck im Zylinder verloren und der Motor büßt Leistung ein. Eine mangelnde Schmierung zwischen schnell beweglichen Metallteilen kann auch dazu führen, dass diese Teile blockieren oder miteinander verschmelzen. Die Viskosität des Öls ist auch ein wichtiger Faktor, da sie den Reibungsverlust erhöhen kann (Leistung geht durch übermäßige Reibung verloren). Heute werden meist chemisch synthetisierte Motoröle mit niedriger Viskosität verwendet, die selbst unter härtester Belastung eine optimale Leistung gewährleisten.

Die Grundlagen des Tunings

Überholen des Motors

Man kann von massengefertigten Motoren keine perfekte Baupräzision erwarten und es gibt Fälle, in denen sie ihr volles Potenzial nicht entfalten können. Den Motor bis in seine kleinsten Komponenten auseinanderzunehmen und sie von Grund auf neu und absolut präzise zusammenzusetzen, kann die Gesamtleistung steigern. Während Sie den Motor auf diese Weise überholen, können Sie seine Eigenschaften noch weiter verbessern, etwa indem Sie bestimmte Teile durch leichtgewichtigere Alternativen ersetzen und für zusätzlichen Nutzen verschiedene Teile abstimmen. Wenn sie keine Hubraumbegrenzungen einhalten müssen, können Sie die Gelegenheit auch nutzen, um den Hubraum des Motors zu erhöhen, wodurch Leistung und Drehmoment problemlos weiter verbessert werden können.

Manche moderne Motoren sind ab Werk schon so fein abgestimmt, dass sie nicht mehr viel Raum bieten, eine Verbesserung durch ein einfaches Überholen der Komponenten zu erreichen.

Vergrößerung des Hubraums

Dies ist die effektivste Möglichkeit, die Leistung zu verbessern, wenn am Motor selbst Modifikationen vorgenommen werden. Durch die Erhöhung der Menge des verbrannten Kraftstoff-Luft-Gemischs kann die Motorleistung verbessert werden. Dies kann durch „Aufbohren" des Zylinder erreicht werden, also durch Vergrößerung der Zylinderbohrung und Einbau von Kolben mit größerem Durchmesser, oder durch die Verlängerung des Kolbenhubs mit einer anderen Kurbelwelle und anderen Pleuelstangen (Pleuel). Zwar haben beide Varianten den Effekt einer Hubraumvergrößerung, sie wirken sich aber unterschiedlich aus: Das Aufbohren eignet sich eher für die Erhöhung der Motordrehzahl für eine bessere Leistung, während die Verlängerung des Kolbenhubs das Drehmoment bei niedrigen und mittleren Drehzahlen steigert. Da die modernen Motoren aber immer leichter sein sollen, werden die Zylinderblöcke immer dünner, was das Aufbohren im großen Stil zunehmend erschwert.

Zylinderblock

Auswuchten

In einem normalen Motor ist das Gewicht der Kolben und Pleuelstangen in den einzelnen Zylindern leicht unterschiedlich. Auch mögliche Abweichungen bei der gleichmäßigen Rotation der Kurbelwelle können für Widerstand sorgen – einer der Hauptgründe für Leistungsverlust. Zum Auswuchten des Motors muss er auseinandergenommen werden und jede Komponente sorgfältig gewogen werden. Indem dafür gesorgt wird, dass jedes Teil dasselbe Gewicht hat und über eine gleichmäßige Rotation die Drehung der Kurbelwelle verbessert wird, kann die Laufruhe des Motors optimiert werden und eine größere Effizienz und somit mehr Leistung erreicht werden. In Situationen, in denen eine Gewichtsanpassung der Teile nicht möglich ist, kann es sinnvoll sein, sie durch neue Teile zu ersetzen. Diese Art des Tunings ist in Markenrennen, bei denen größere Modifikationen am Auto nicht zulässig sind, absolut essenziell.

Gewichtsreduktion

Auf Motorteile, die sich mit hoher Geschwindigkeit bewegen, wirkt die Massenträgheit ein und sorgt für Reibungsverlust und weniger Leistung. Das kann verhindert werden, indem die Komponenten durch Materialentfernung leichter gemacht werden. Dieser Prozess wird in der Regel parallel zum Auswuchten durchgeführt. Wenn die Teile aber zu stark abgeschliffen werden und zu dünn sind, kann es Probleme mit der Haltbarkeit geben.

Verstärkung

Werden an einem Motor größere Tuning-Arbeiten durchgeführt, nimmt die Belastung der Einzelkomponenten stark zu, wodurch das Risiko erhöht wird, dass diese Teile beschädigt werden. Dies macht stabilere Teile erforderlich – aber es ist genauso wichtig, dass diese Teile leicht sind. Verstärkte Teile, die mithilfe neuer Schmiedetechniken hergestellt wurden, und neue Materialien wie Titanlegierungen, sind einerseits wesentlich leichter als normale Motorteile, aber auch ihre Stabilität und Haltbarkeit übertreffen die normaler Motorteile bei weitem. In Renn- und Tuningmotoren ist der Einsatz von geschmiedeten Aluminiumkolben und Pleuelstangen aus Titanlegierungen mittlerweile Standard.

Setzen Sie das ganze Potenzial Ihres Autos frei

Erhöhung der Drehzahl

Die Motorleistung ist eine Kombination aus Drehmoment und Drehzahl (Leistung = Drehmoment x U/min). Das heißt, wenn Sie die Fähigkeit Ihres Motors, hohe Drehzahlen zu erreichen, verbessern, wird auch seine potenzielle Leistungsabgabe gesteigert. Das hierfür erforderliche Tuning konzentriert sich auf die Zylinderköpfe – der Schlüssel zum Erfolg liegt in der Steigerung der Effizienz von Lufteinlass und -auslass bei hohen Drehzahlen. Die Standardprozedur ist das Austauschen der normalen Nockenwelle durch eine Nockenwelle mit großem Hub. Dies bedeutet zwar, dass die Komponenten um die Ventile herum verstärkt werden müssen, es wird aber derselbe Effekt wie bei einer Vergrößerung der Einlass- und Auslassöffnungen erzielt, was die Leistung bei hohen Drehzahlen erheblich steigert. Die Motoren, die sich für hohe Drehzahlen am besten eignen, sind kurzhubige Motoren, da sie eine hohe Luftdurchlass-Effizienz besitzen, aber ihre mittlere Kolbengeschwindigkeit nicht so hoch wie bei langhubigen Motoren ist.

Mit einer Nockenwelle mit großem Hub kann ein Motor höhere Drehzahlen und größere Leistung erzielen. Auf diese Weise wird das Drehmoment bei niedrigen und mittleren Drehzahlen jedoch stark reduziert und bei einigen reinrassigen Rennmotoren wird dies den ruhigen Leerlaufbetrieb beeinträchtigen.

Einlass- und Auslasskanäle

Die Einlass- und Auslasskanäle ermöglichen dem Kraftstoff-Luft-Gemisch den Eintritt in den Motor – und den Abgasen den Austritt nach der Verbrennung. Idealerweise sollte der Strom durch die Kanäle so glatt wie möglich ablaufen, aber aus Kostengründen ist dies bei durchschnittlichen Motoren in der Regel nicht der Fall. Raue Oberflächeneigenschaften des Gusseisens, die Größe der Durchlässe, Verformungen usw. sorgen für Widerstände bei Einlass und Auslass. Durch das Polieren dieser Oberflächen kann ein besserer Luftstrom erzielt werden. Wenn man nur die Kanäle poliert, wird sich der Motor in hohen Drehzahlbereichen besser anfühlen, aber den vollen Nutzen erreichen Sie wahrscheinlich erst, wenn Sie die Maßnahme mit einem kompletten Tuning des Zylinderkopfes kombinieren (einschließlich Polieren des Zylinderkopfes und Austausch der Nockenwelle).

Einlass- und Auslasskanäle

Nockenwelle

Die Nockenwelle ist eine Spindel, die die Einlass- und Auslassventile öffnet und schließt. Eine Nockenwelle mit großem Hub verfügt über höhere Nockenbereiche, die bewirken, dass sich die Ventile für eine längere Zeit öffnen. Das hat den gleichen Effekt wie eine Vergrößerung der Einlass- und Auslasskanäle. Und während das Drehmoment bei niedrigen und mittleren Drehzahlen geringfügig reduziert wird, steigt die Motorleistung bei höheren Drehzahlen drastisch. Obwohl diese Technik beim plötzlichen Leistungsanstieg mit hohen Motordrehzahlen Probleme bei der Kontrolle des Motors macht, wird sie häufig verwendet, um zusätzliche Leistung aus einem Saugmotor zu kitzeln.

Rechts eine normale Nockenwelle, links eine Nockenwelle mit großem Hub. Die höheren Nockenbereiche sorgen dafür, dass sich die Ventile länger öffnen.

Ventile

Gleichzeitig mit dem Polieren der Einlass- und Auslasskanäle und dem Austausch der Nockenwelle sollten Sie auch eine Vergrößerung Ihrer Ventile in Betracht ziehen. Bei dieser Tuningmethode wird die Öffnung des Einlassventils vergrößert, um mehr Zuführung zu ermöglichen und die Einlasseffizienz zu erhöhen. Da größere Ventile schwerer sind und die Massenträgheit stärker auf sie wirkt, werden sie oft aus ultraleichtem Titan hergestellt.

Ventilfeder

Hohe Motordrehzahlen können bewirken, dass die Federn vibrieren, die die Ventile geschlossen halten, was zu einem „Ruckeln" führen kann, bei dem Ausdehnung und Kompression der Federn nicht mit der Bewegung der Nockenwelle Schritt halten können. In einem leistungsgetunten Motor ist eine Aufrüstung der Ventilfedern notwendig, um dies zu verhindern. Die Notwendigkeit wird noch größer, wenn eine Nockenwelle mit großem Hub zum Einsatz kommt – normale Federn sind unter Umständen nicht auf den größeren Hub der Ventile ausgelegt und die Feder kann (in extremen Fällen) an der Nocke hängen bleiben und diese blockieren, oder Ventil und Kolben können kollidieren. Denken Sie jedoch daran, dass der Einsatz von stärkeren Federn den Widerstand erhöht und auf diese Weise der Bereich um die Ventile herum stärker beansprucht wird.

Höhere Drehzahlen für eine bessere Leistung

Die Verdichtung steigern

Je größer der Grad, zu dem ein Motor das Kraftstoff-Luft-Gemisch verdichten kann, desto stärker die Verbrennung, die ausgelöst wird, sobald der Kraftstoff gezündet wird, und desto größer die Leistung und das Drehmoment. Im Zentrum dieses Tunings steht eine Erneuerung des Brennraumvolumens im Zylinderkopf. Wenn aber die Verdichtung zu stark gesteigert wird, erhöht dies den Widerstand beim Drehen des Motors (Verdichten) und es kann auch zu einer abnormalen Verbrennung kommen. Hochverdichtende Motoren erfordern diverse Anpassungen, um dieser Probleme Herr zu werden – zum Beispiel eine Anpassung der Kraftstoffmenge, die in die Zylinder gelangt, ein Wechsel zu „kalten" Zündkerzen und eine Verzögerung der Zündung sowie eine Verstärkung der Kolben und Pleuelstangen, um sie auf die verstärkte Verbrennungskraft des Motors auszulegen.

Kolben

Die gängigste Möglichkeit, das Verdichtungsverhältnis eines Motors zu erhöhen, ist der Wechsel zu Hochdruckkolben. Wie man an der Erhöhung auf der Oberseite dieser Kolben sehen kann, ist der Brennraum kleiner im Vergleich zu normalen Kolben, wodurch das Verdichtungsverhältnis erhöht wird. Eine gesteigerte Verdichtung führt jedoch zu einem heißeren Kraftstoff-Luft-Gemisch und höheren Temperaturen während der Verbrennung, und die Wahrscheinlichkeit für ein „Klopfen" des Motors (fehlerhafte Verbrennung des Kraftstoff-Luft-Gemisches) steigt. Dieser Umstand macht weitere Maßnahmen (etwa die Verbesserung des Durchflusses des Kraftstoff-Luft-Gemisches) erforderlich.

Eine Erhöhung der Verdichtung sollte idealerweise parallel zu einer Steigerung der potenziellen Drehzahl des Motors durchgeführt werden. Außerdem müssen die internen Komponenten des Motors verstärkt werden, da bei der Verbrennung eine größere Kraft wirkt.

Brennraum

Es gibt zahlreiche Modifikationstechniken für Brennräume, wobei der „dachförmige" Typ eine der wichtigsten darstellt und einen besseren Durchfluss sowie eine bessere Zündeffizienz bietet. Aber die gebräuchlichste Methode, um das „Klopfen" bei erhöhter Verdichtung zu verhindern, umfasst den Einsatz von sogenannten „Quetschzonen". Dabei handelt es sich um in den Brennraum geschnittene Bereiche, in denen die Verdichtung konzentriert wird. Auf diese Weise kann das Verdichtungsverhältnis insgesamt geringfügig reduziert werden. Allerdings können derartige „Quetschzonen" Unterschiede im Volumen der einzelnen Brennräume bewirken, weshalb nach der Durchführung präzise Vermessungen der Brennräume vonnöten sind, um sicherzustellen, dass sie ausgewogen sind.

Zylinderkopf

Die Unterseite des Zylinderkopfes kann in 0,1-mm-Schritten abgeschliffen werden, um die Kapazität des Brennraumes allmählich zu reduzieren und auf diese Weise das Verdichtungsverhältnis zu erhöhen. Diese Maßnahme kann auch durchgeführt werden, um mögliche Verbiegungen auszugleichen, die bei extrem hohen Motortemperaturen entstehen können, um die optimale Passform von Zylinderblock und -kopf wiederherzustellen und mögliche Probleme aufgrund einer mangelhaften Verdichtung zu beheben.

Zylinderkopfdichtung

Die Zylinderkopfdichtung ist die Platte, die zwischen Zylinderblock und -kopf sitzt und für eine optimale Versiegelung zwischen beiden Komponenten sorgen soll. Auf diese Weise verhindert sie einen Verlust der Verdichtung. Eine Reduktion der Dicke der Kopfdichtung hat den gleichen Effekt wie das Abschleifen des Zylinderkopfes – die Kapazität des Brennraums wird reduziert und so das Verdichtungsverhältnis gesteigert. Moderne Zylinderkopfdichtungen werden in der Regel aus rostfreiem Stahl hergestellt, da dieser sehr stabil ist und Temperaturen extrem gut leitet. Das ermöglicht eine Optimierung der Verdichtungsrate und verhindert Druckverlust an den Zylindern.

Steigerung der Verbrennungskraft

Zufuhr von großen Mengen verdichteter Luft

Ladedruck

Der Ladedruck gibt Aufschluss über das Volumen der Luft, die ein Turbolader ansaugt, und wie stark er diese verdichtet: Er wird in kg/cm², kPa oder psi angegeben. Je höher dieser Wert, desto mehr Leistung wird erzielt. Je mehr Luft jedoch angesaugt wird, desto mehr Kraftstoff ist erforderlich, um diesen mit der Luft zu vermischen. Dieser Umstand erfordert eine Konfiguration der Motorsteuerung, die mehr Kraftstoff einleitet, und es kann nötig sein, Einspritzdüsen auszutauschen oder hinzuzufügen, damit größere Mengen Kraftstoff zugeführt werden können. Außerdem ist es wichtig, die internen Motorkomponenten zu verstärken, damit sie mit der Belastung durch die gesteigerte Verbrennung fertig werden.

Hochdruck-Turbine

Hierbei handelt es sich um einen Turbo, bei dem das Kompressorrad vergrößert wird, das die in den Turbolader gesaugte Luft verdichtet, wodurch der Luftdurchfluss enorm gesteigert wird. Durch ein sogenanntes „Cutback" – ein Prozess, bei dem der Gegendruck der Turbine verringert wird – kann die Massenträgheit reduziert werden, die auf das Turbinenrad wirkt, wodurch über eine schnelle Erhöhung des Turbodrucks eine Leistungssteigerung bei minimaler Beeinträchtigung des Ansprechverhaltens erreicht wird.

Hilfsmittel zur Motoraufladung

Die Steigerung des Ladedrucks oder die Vergrößerung des Bauteils für die Motoraufladung sind relativ einfache Möglichkeiten, denselben Effekt zu erzielen wie durch eine Vergrößerung des Hubraums, ohne den Motor selbst modifizieren zu müssen. Wird diese Maßnahme aber mit einem mechanischen Tuning kombiniert, können noch bessere Resultate erzielt werden. Dabei darf man jedoch nicht vergessen, dass bei der Motoraufladung die Belastung des Motors im Vergleich zu Saugmotoren größer ist, weshalb in diesem Bereich Maßnahmen ergriffen werden müssen. Bei einem Saugmotor ist ein hohes Verdichtungsverhältnis der Schlüssel zu einer Leistungssteigerung des Motors, wohingegen in einem Motor mit Kompressor oder Turbolader die Verdichtung minimiert werden muss, um eine abnormale Verbrennung oder eine Beschädigung der Komponenten durch die gesteigerte Verbrennung zu verhindern. Ein zeitverzögertes Ansprechverhalten ist bei turbogeladenen Motoren ebenfalls ein Problem und es müssen Maßnahmen ergriffen werden, um diese Problematik in Grenzen zu halten.

Vergrößerung der Turbine

Bei diesem Tuning wird der normale Turbolader durch einen größeren ersetzt, denn die Größe des Turboladers bestimmt die Grenzen der Turbinenleistung. Auf diese Weise wird zwar ein spürbarer Leistungszuwachs erreicht, bei einer größeren Turbine spricht der Motor aber auch langsamer an. Außerdem müssen Sie bedenken, dass, sofern Sie keinen Motor mit großem Hubraum, der viel Abgas erzeugt, und/oder einen extrem leistungsstarken Motor haben, das Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen sehr gering ist und der Turbolader erst bei sehr hohen Drehzahlen effektiv arbeitet, sodass das Auto extrem schwierig zu beherrschen sein wird.

Zwischenkühler

Der Zwischenkühler spielt in einem turbogeladenen Motor eine wichtige Rolle – er kühlt die durch die Verdichtung des Turboladers erwärmte Luft ab und verbessert den volumetrischen Wirkungsgrad des Motors. Selbst in vielen Serienfahrzeugen gehören Zwischenkühler mittlerweile zum Standard. Ein größerer Zwischenkühler ist effizienter und bietet bessere Kühleigenschaften. Andererseits braucht verdichtete Luft zu lange, um durch einen zu großen Zwischenkühler zu kommen und verliert an Druck. Das kann zuweilen zu einem Verlust von 10 - 20 % des Turbo-Ladedrucks führen.

Kompressor

Das Prinzip hinter dem Kompressor ähnelt dem des Turboladers: Im Wesentlichen presst er verdichtete Luft in den Motor, was zu einer Leistungssteigerung führt. Wie Turbolader können auch Kompressoren in Saugmotoren eingebaut werden, um auf relativ einfache Weise die Motorleistung zu steigern. Die Tatsache, dass Kompressoren bei der Beschleunigung nicht zeitverzögert ansprechen, kommt auf technisch anspruchsvollen Rennstrecken, die ein schnelles Ansprechverhalten erfordern, voll zur Geltung.

Wankelmotoren

Eines der Hauptziele beim Tuning eines Wankelmotors ist die Steigerung der Lufteinlass-Effizienz. Das wird durch eine Vergrößerung der Einlasskanäle erreicht. Auf diese Weise gelangt mehr Kraftstoff-Luft-Gemisch in den Brennraum. Der Effekt ähnelt dem, der durch den Einbau einer Nockenwelle mit großem Hub in einen Hubkolbenmotor erzielt wird, aber der Leistungszuwachs durch die andere Positionierung und Vergrößerung der Ein- und Auslasskanäle kann sehr unterschiedlich sein. Umfangseinlässe zum Beispiel – eine Technik, die in Rennwagen mit Wankelmotor zum Einsatz kommt – bewirken einen enormen Drehmomentverlust bei niedrigen Drehzahlen, weshalb ein normales Fahren extrem schwierig wird. Außerdem liegen bei einem Wankelmotor die Auslasskanäle und der Turbolader sehr eng beieinander, wodurch die Abgase die Turbine sehr effizient antreiben können. Ein kombiniertes Tuning der Ein-/Auslasskanäle und des Turboladers kann das Potenzial des Motors effektiv steigern.

Einer der größten Vorteile des Tunings von Wankelmotoren ist deren gute Kompatibilität mit Turboladern. Ein kombiniertes Tuning der Einlass- und Auslasskanäle und des Turboladers erzielt exzellente Leistungswerte und Laufeigenschaften zu erhalten.

Anordnung der Einlasskanäle – Leistungssteigerung für den Wankelmotor

Brückeneinlass

Dies ist eine Methode, den Seiteneinlass zu tunen. Man nennt ihn Brückeneinlass, weil ein „überbrückter" Bereich den mittleren Teil der Form des vergrößerten Einlasses bildet.

Der Grund, warum eine Brücke zwischen den beiden Öffnungen anstatt einer einzigen großen Öffnung verwendet wird, liegt darin, dass bei einer Vergrößerung des Einlasses bis ans Limit diese Brücke benötigt wird, um die Dichtleiste zu unterstützen, damit sie sich bei Berührung nicht verzieht oder herausfällt.

Abstimmung

Im Vergleich zum Hubkolbenmotor ist die Struktur eines Wankelmotors einfach und er besteht aus weniger Komponenten. Eine Menge zusätzliches Potenzial kann bereits durch eine Verbesserung der Präzision der einzelnen Teile und ein sorgfältiges Zusammensetzen des Motors freigesetzt werden. Die größte Bedeutung bei diesem Prozess kommt dem Platzieren der Dichtungen zu. Die Eckkantendichtungen des Rotors entsprechen den Kolbenringen eines Hubkolbenmotors und wenn sie so platziert werden können, dass alle exakt denselben Abstand haben, kann der Rotor leicht drehen und eine perfekte Verdichtung erreichen. Schlecht platzierte Dichtungen können zu einem Leistungsverlust und (im schlimmsten Fall) zu Motorschäden führen.

Seiteneinlass

Durch eine Erweiterung des Durchmessers der Einlasskanäle, die seitlich am Motorgehäuse platziert sind, kann die Luft schneller als üblich in den Motor eingeleitet werden, wodurch das Gesamtansaugvolumen vergrößert und die Leistung gesteigert wird. Das hat ungefähr den gleichen Effekt wie die Ausstattung eines Hubkolbenmotors mit einer Nockenwelle mit großem Hub.

Umfangseinlass

Bei dieser Tuning-Methode für Wankelmotoren werden die seitlichen Einlasskanäle mithilfe eines Spezialklebers ausgefüllt und anschließend in den oberen Teil des Rotorgehäuses verlegt. Der Vorteil hierbei liegt darin, dass das Kraftstoff-Luft-Gemisch direkt in das Rotorgehäuse transportiert und die Motorleistung bei hohen Drehzahlen wesentlich gesteigert wird. Leider bedeutet dies auch, dass der Motor bei niedrigen Drehzahlen kein Drehmoment aufbauen kann, da er nicht mehr zwischen hohen und niedrigen Geschwindigkeiten unterscheiden und das Kraftstoff-Luft-Gemisch entsprechend anpassen kann. Daher geht der Leistungszuwachs bei hoher Drehzahl stark auf Kosten des Drehmoments im unteren Drehzahlbereich und führt zu extremen Eigenschaften hinsichtlich der Leistungsabgabe, die schwer zu kontrollieren sind.

Kombinierte Schlitzanordnung

Diese auch „Cross-Porting" genannte Technik kombiniert Seitenein- und -auslässe (oder Brückeneinlässe) mit Umfangseinlässen. Sie nutzt die Vorteile beider Schlitzanordnungen, indem sie mithilfe eines sequenziellen Systems die Seiteneinlässe nur bei niedrigen Drehzahlen und die Umfangseinlässe nur bei hohen Drehzahlen verwendet.

Den Antrieb tunen

Der Antrieb eines Fahrzeugs setzt die Motorleistung in Geschwindigkeit um. Er muss die Leistung so effizient wie möglich auf die Straßenoberfläche bringen und robust genug sein, um hohe Motorleistungen mit Leichtigkeit umzusetzen.

Die beste Leistung aus dem Motor herausholen

Übersetzungsverhältnis des Endantriebszahnrades

Mit der Anpassung der Übersetzung des Endantriebszahnrades können Sie wählen, ob sie die Motorkraft für Höchstgeschwindigkeit oder Beschleunigung einsetzen. Ein hochdrehender Hochleistungsmotor mit extrem unterschiedlichen Eigenschaften bei niedrigen und hohen Drehzahlen kann zum Beispiel besser genutzt werden, wenn Sie die Übersetzung des Endantriebszahnrades niedrig ansetzen. Damit können die Beschleunigungsfähigkeiten des Autos stark verbessert werden.

Lange Übersetzung

Dieses Tuning eignet sich, wenn Sie die Höchstgeschwindigkeit Ihres Autos steigern möchten, da es die Geschwindigkeit aus niedriger Drehzahl heraus erhöht. Es bietet auch wesentliche Vorteile in Bezug auf den Kraftstoffverbrauch. Der Nachteil ist die Zeitverzögerung, mit der das Auto beim Beschleunigen den optimalen Drehmomentverlauf erreicht, was die Beschleunigung negativ beeinflusst. So wird es zum Beispiel erschwert, nach der Ausfahrt aus engen Kurven die gewünschte Leistung und das optimale Drehmoment zu erhalten, und es wird schwieriger eine angemessene Beschleunigung zu erreichen.

Kurze Übersetzung

Mit einer kurzen Getriebeübersetzung kann der Motor selbst in hohen Gängen wie dem dritten oder vierten hohe Drehzahlen aufrechterhalten. Zwar wird Höchstgeschwindigkeit geopfert, aber der Motor kann leichter seine Leistung und sein Drehmoment entfalten. Sie können die Leistung des Motors beim Beschleunigen aus der Kurve heraus voll ausnutzen, weshalb sich eine kurze Übersetzung besonders für technisch anspruchsvolle Strecken mit vielen engen Kurven eignet. Der einzige Nachteil ist die Gefahr aufgrund des viel schnelleren Ansprechens des Gaspedals zu überdrehen.

Lange Getriebeübersetzung (Kurze Getriebeübersetzung)

1. Gang 2. Gang 3. Gang 4. Gang 5. Gang 6. Gang

Motor U/min: 1500 3000 4500 6000 7500 9000

Geschwindigkeit km/h: 0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200

Lange Getriebeübersetzung (Kurze Getriebeübersetzung)

1. Gang 2. Gang 3. Gang 4. Gang 5. Gang 6. Gang

Motor U/min: 1500 3000 4500 6000 7500 9000

Geschwindigkeit km/h: 0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200

Getriebeübersetzung

Das Tuning der Getriebeübersetzung versucht in der Regel, das Übersetzungsverhältnis der Zahnräder des Getriebes einander anzunähern (d. h. ihre Größe mehr einander angleichen, um eine „kürzere Übersetzung" zu schaffen). Das macht es leichter, innerhalb des optimalen Drehzahlverlaufs zu bleiben, und verbessert die Beschleunigungsleistung enorm. Je nach Übersetzung des Endantriebszahnrades kann es jedoch auch dazu führen, dass ein Auto zu hoch dreht und häufige Gangwechsel notwendig werden.

Kurze Übersetzung

Bei einer manuellen Gangschaltung mit kurzer Getriebeübersetzung ist der Größenunterschied der Zahnräder relativ gering. Je kürzer die Übersetzung, desto kleiner ist der Drehzahlverlust beim Hochschalten durch die Gänge und desto effizienter kann die Motorleistung ausgenutzt werden. Dieses Getriebe eignet sich besonders für Saugmotoren mit Drehzahlbändern, die durch den Wechsel zu einer Nockenwelle mit großem Hub oder durch andere Tuning-Maßnahmen geschmälert wurden. Diese Einstellungen werden normalerweise mit Blick auf das Streckenlayout vorgenommen und zusammen mit der Wahl des Übersetzungsverhältnisses des Endantriebszahnrades.

Lange Übersetzung

Die meisten Serienwagen sind auf eine maximale Wirtschaftlichkeit hin ausgelegt – deshalb wird die Drehzahl niedrig gehalten. Aus diesem Grund ist der Größenunterschied zwischen den einzelnen Zahnrädern relativ groß. Leider bedeutet das, dass beim Hochschalten weniger Motorkraft auf die Straße übertragen wird und Beschleunigungskraft verloren geht. Normalerweise verfügt ein Auto nicht in allen Gängen (vom ersten bis zum fünften oder sechsten) über eine lange Übersetzung, sondern nutzt einen Mix aus kurzen und langen Übersetzungen, um die charakteristischen Eigenheiten des Motors optimal auszunutzen und das Auto auf die Rennstrecke abzustimmen. So kann zum Beispiel für den ersten und zweiten Gang eine kurze Übersetzung verwendet werden, um stehende Starts und Beschleunigung zu optimieren, und für den dritten Gang und darüber hinaus eine lange Übersetzung.

Den Leistungsverlust begrenzen und das Ansprechverhalten verbessern

Kupplung

Die Verstärkung der Kupplung ist bei einem hochgetunten Fahrzeug unverzichtbar, damit die gesteigerte Motorleistung mit einem minimalen Leistungsverlust an das Getriebe übertragen und effizient geschaltet werden kann. Selbst der geringste Schlupf kann die Beschleunigungsleistung beeinträchtigen. Es geht darum, den Reibungsgrad der Kupplungsscheibe und den Druck der Druckplatte proportional zur Leistungs- und Drehmomentsteigerung des Motors zu verstärken.

Scheibe & Druckplatte

Die konventionellste Methode, eine Kupplung zu verstärken, ist das Ersetzen der vorhandenen Kupplungsscheibe und der Druckplatte durch robustere Teile. Indem die Reibung der Kupplungsscheibe und der Druck der Druckplatte erhöht werden, kann die Motorleistung zuverlässiger zum Getriebe übertragen werden. Es handelt sich um entscheidende Komponenten für die Verbesserung der Motorkraft, und ihr großer Vorteil ist, dass es keine Verzögerungen im Ansprechverhalten gibt, selbst wenn sie im Rennsport sehr aggressiv eingesetzt werden. Heutzutage werden im Allgemeinen Kupplungsscheiben aus Metall verwendet, da sie bessere Reibung und Lebensdauer bieten.

Mehrscheibenkupplungen

Normale Kupplungen verwenden nur eine einzelne Kupplungsscheibe, aber durch die Verwendung einer Kupplung mit mehreren Scheiben wird die Reibungsfläche vergrößert. Verstärkte Kupplungen wie diese mit höherem Druck der Druckplatte und der verbesserten Fähigkeit, Motorleistung zu übertragen, verwenden zwischen zwei und vier Scheiben. Die Reibung steigt proportional zur Anzahl der verwendeten Kupplungsscheiben, also kann die günstigste Anzahl der Scheiben abhängig von der Leistungssteigerung gewählt werden. Zwar werden Ansprechverhalten und Haltbarkeit erhöht, aber der Nachteil der Mehrscheibenkupplung liegt in ihrer Funktionsweise. Sie benötigt mehr Kraft für das Auskuppeln, wodurch das Kupplungspedal sehr schwerfällig ist und bei der Bedienung große Präzision benötigt wird.

Schwungrad und Antriebswellen

Die Antriebskomponenten durch leichtgewichtigere Teile zu ersetzen, kann eine äußerst effektive Möglichkeit sein, das Ansprechverhalten des Gaspedals und die Beschleunigung zu verbessern. Mit einem extrem leichtgewichtigen Schwungrad kann das Auto jedoch Probleme haben, bei Bergauffahrten ein ausreichendes Drehmoment zu erreichen und um dies zu kompensieren, müssen zusätzliche Tuning-Maßnahmen vorgenommen werden.

Leichte Schwungräder

Das Schwungrad befindet sich am hinteren Ende der Kurbelwelle unmittelbar vor der Kupplung und seine Hauptaufgabe ist das Unterbinden von Unregelmäßigkeiten im Motorlauf. Je schwerer das Schwungrad, desto ausgeglichener kann der Motor drehen. Ein schweres Schwungrad kann jedoch hinderlich sein, wenn hohe Geschwindigkeiten Ihr Ziel sind, und es ist von Vorteil, das vorhandene Schwungrad durch ein leichteres zu ersetzen. Das kann zwar auf Kosten der Laufruhe gehen und das Drehmoment reduzieren, hat aber den Vorteil, dass das Ansprechverhalten beim Beschleunigen verbessert wird.

Leichte Antriebswellen

Eine Antriebswelle überträgt die Motorleistung vom Getriebe zum Differenzial. Ein Austausch der regulären Antriebswelle durch ein leichteres Modell kann das Ansprechverhalten und die Beschleunigung des Motors verbessern. Leichte Antriebswellen werden in der Regel aus Carbon oder Glasfaser (FKV) hergestellt und wiegen bis zu 50 % weniger als gewöhnliche Wellen. Das reduzierte Gewicht ist natürlich der Hauptvorteil einer leichten Antriebswelle – ein zusätzlicher Bonus ist aber eine sanftere Rotation.

Die Leistung zuverlässig auf die Straßenoberfläche übertragen

Sperrdifferenzial

Ein Sperrdifferenzial ist für die zuverlässige Übertragung der Leistung vom Motor auf die Straße unverzichtbar und ermöglicht Hochgeschwindigkeits-Kurvenfahrten. Von den verschiedenen erhältlichen Typen wird der Rotationsunterschied der Antriebsräder am besten mit dem mechanischen Sperrdifferenzial begrenzt, das eine Mehrscheibenkupplung verwendet. Das liegt daran, dass es die größte Freiheit beim Festlegen der Begrenzung des Rotationsunterschieds bietet. Es kann deshalb auf der Basis des Antriebs, der Eigenheiten eines bestimmten Autos oder Fahrstils, des Streckenverlaufs und einer Vielzahl anderer Faktoren so angepasst werden, dass es die bestmögliche Traktion bietet. Der Nachteil dieser Entscheidungsfreiheit ist die Tatsache, dass die starke Belastung der einzelnen Teile regelmäßige Ölwechsel und Wartung erforderlich macht.

Bei mechanischen Sperrdifferenzialen besteht die größte Freiheit beim Einstellen der Begrenzung des Rotationsunterschieds zwischen den Rädern. Da sie aber spezielle Motorsportkomponenten sind, gehören sie in der Regel nicht zur Standardausstattung.

Sperrwert

Der Sperrwert beschreibt den Punkt, an dem ein Sperrdifferenzial den Rotationsunterschied zwischen zwei Rädern begrenzt. In einem normalen (offenen) Differenzial beträgt der Sperrwert 0 % (d. h. die Räder können vollkommen unabhängig voneinander drehen) wohingegen 100 % eine vollständige Differenzialsperre bezeichnen (die Räder müssen sich jederzeit gleich schnell zu drehen). Je höher der Sperrwert, desto strikter das Limit für den erlaubten Rotationsunterschied. Ein hoher Sperrwert ist nicht notwendigerweise besser. Es empfiehlt sich eher, den Sperrwert anhand von Faktoren wie dem Antrieb, der Fahrzeughöhe und der Streckenbreite einzustellen und den jeweils erforderlichen Fahrcharakteristika anzupassen. Ist der Sperrwert zu hoch eingestellt, verstärkt dies das Untersteuern und beeinträchtigt das Kurvenverhalten. In der Regel sagt man, dass ein Sperrwert von ca. 50 % die beste Kontrolle ermöglicht und gleichzeitig eine optimale Funktion des Differenzials garantiert. Aber die perfekte Einstellung für eine bestimmte Situation findet man nur durch ausgiebige Tests.

Anfangsdrehmoment

Das Anfangsdrehmoment bezeichnet den Druck, der auf die Scheiben im Inneren des Differenzialgehäuses einwirkt. Die Erhöhung/Senkung des Anfangsdrehmoments beeinflusst die Zeit bis zur Sperrung des Differenzials. Je höher der Wert, desto besser ist das Ansprechverhalten beim Beschleunigen, da die Sperrwirkung des Differenzials annähernd sofort einsetzt. Je niedriger er ist, desto sanfter sperrt das Sperrdifferenzial und desto leichter fällt das Fahren. In der Regel erhöht ein Sperrdifferenzial-Tuning das Anfangsdrehmoment, aber auf diese Weise kann das Kurvenfahrverhalten beeinträchtigt und in Fahrzeugen mit Frontmotor/Frontantrieb das sogenannte „Drehmomentsteuern" verstärkt werden, also ist dies nicht immer der Fall. In jüngerer Zeit erfreuen sich Sperrdifferenziale mit einem niedrigen Anfangsdrehmoment und hohen Sperrwerten zunehmender Beliebtheit.

Mechanische Sperrdifferenzial-Typen

1-Weg

Dieser Sperrdifferenzialtyp funktioniert nur, wenn das Auto beschleunigt. Da er ohne Treten auf das Gaspedal nicht arbeitet, ermöglicht er bei der Anfahrt auf eine Kurve die freie Bewegung der Räder an der Innenseite – ganz wie ein offenes Differenzial. Auf diese Weise wird ein sanfteres Kurvenverhalten erreicht. Dieser Sperrdifferenzialtyp eignet sich besonders für Autos mit Frontmotor/Frontantrieb, da diese zum Untersteuern neigen. Er bewirkt jedoch einen spürbaren Unterschied im Handling des Autos, je nachdem, ob das Gaspedal getreten wird oder nicht.

2-Wege

Dieser Sperrdifferenzialtyp funktioniert, ob das Gaspedal getreten wird oder nicht. Das bewirkt ein relativ starkes anfängliches Untersteuern, verleiht dem Fahrzeug aber Stabilität beim Abbremsen und ermöglicht so extremere Kurvenfahrten. Er bietet außerdem ein exzellentes Ansprechverhalten und erlaubt es dem Fahrer, durch Gasgeben die Fahrtrichtung des Autos aggressiv zu ändern.

1,5-Wege

Dieser Sperrdifferenzialtyp kombiniert die Eigenschaften der 1-Weg- und 2-Weg-Systeme. Das Sperrdifferenzial funktioniert normal beim Beschleunigen, der Effekt ist jedoch beim Abbremsen reduziert, um bei der Anfahrt in die Kurve ein leichteres Einlenken zu ermöglichen. Diese Allroundlösung weist nicht die Eigenarten auf, die die anderen Sperrdifferenzialtypen beeinträchtigen.

KAROSSERIE

KAPITEL 03 Tuning & Einstellungen

Die Karosserie in Form bringen

Eine leichte, verwindungssteife Karosserie für gute Beschleunigung und Kontrolle ist im Rennsport von größter Bedeutung. Egal wie sehr Sie die Leistung Ihres Motors verstärken – wenn Ihre Karosserie zu schwer und zu biegsam ist, ist es wenig wahrscheinlich, dass sich das Plus an Leistung in Geschwindigkeit umwandeln lässt.

Gewichtsreduzierung und Verwindungssteifigkeit

Wenn Sie das Ziel haben, die Endgeschwindigkeit und die Wendigkeit Ihres Autos zu verbessern, sind die Gewichtsreduzierung und die Verstärkung der Karosserie entscheidende Faktoren. Die Gewichtsreduzierung dient nicht nur der Steigerung der Beschleunigung, sondern bewirkt zusätzlich spürbare Vorteile beim Bremsen und bei Kurvenfahrten. Eine bessere Verwindungssteifigkeit ermöglicht es der Aufhängung, sich richtig zu bewegen, auch wenn das Auto schweren Belastungen ausgesetzt ist, und sorgt für festen Straßenkontakt der Reifen. Und damit ein Fahrer die Bewegungen des Autos in extremen Fahrsituationen erkennen und das Auto präzise kontrollieren kann, ist eine verwindungssteife Karosserie, die sich nicht verformt, essenziell. Auf Strecken wie dem Nürburgring, auf denen der Traktionskoeffizient (μ) extrem niedrig ist und starke G-Kräfte seitlich und vertikal auf das Auto einwirken, ist es unmöglich, mit einem Auto ohne ausreichende Verwindungssteifigkeit der Karosserie auch nur eine einzige zufriedenstellende Runde zu absolvieren.

Punktschweißen

Die Karosserie eines Autos besteht aus Metallblechen, die zusammengepresst und anschließend in regelmäßigen Abständen an Punkten verschweißt wurden. Bei Serienfahrzeugen, bei denen der Effizienz des Herstellungsprozesses die größte Bedeutung beigemessen wird, werden die Bleche mit der minimal möglichen Anzahl von Schweißpunkten verschweißt. Das kann zu Mängeln in der Verwindungssteifigkeit führen. Um hier Abhilfe zu schaffen, können zusätzliche Schweißarbeiten vorgenommen werden, um die Anzahl der Schweißpunkte zu erhöhen und Stabilität und Verwindungssteifigkeit der Karosserie deutlich zu verbessern. Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass keine neuen Komponenten erforderlich sind und Sie sich keine Sorgen über mögliches zusätzliches Gewicht machen müssen.

Domstrebe

Diese Strebe wird so angebracht, dass sie die Befestigungspunkte der Aufhängung auf der linken und rechten Seite der Karosserie (über dem Radkasten) verbindet. Sie macht den vorderen Teil der Karosserie verwindungssteifer und garantiert präzise Bewegungen der Aufhängung, während sie zugleich das Ansprechverhalten der Lenkung optimiert. Im Allgemeinen sollte eine Domstrebe gemeinsam mit verbesserten Federn, Stoßdämpfern und Lagerbuchsen installiert werden. Es ist üblich, dass Domstreben nur im vorderen Teil des Fahrzeugs zum Einsatz kommen, aber für eine ausgewogenere Verwindungssteifigkeit sollte nach Möglichkeit auch hinten eine installiert werden.

Für ein präzises Handling

Überrollkäfig

Überrollkäfige haben die Aufgabe, die Passagiere bei einem Unfall zu schützen, aber sie können ebenfalls extrem effektiv eingesetzt werden, um die Verwindungssteifigkeit der Karosserie zu verbessern. Um das zu erreichen, darf es keinen Freiraum zwischen dem Überrollkäfig und den Dach- und Säulenbereichen geben, und er muss fest verschweißt und nicht nur einfach verschraubt werden. Der Überrollkäfig muss zudem über ausreichend Streben und Stützen verfügen, damit überhaupt eine signifikante Steigerung der Verwindungssteifigkeit möglich wird.

Chassisversteifung

Eine Chassisversteifung ist eine Metallstrebe, die sich nur sehr schwer verdrehen oder verbiegen lässt. Sie verbessert die Verwindungssteifigkeit des Fahrzeugbodens und dient gleichzeitig dazu, die Aufhängung mit dem Fahrwerk zu verbinden und unerwünschte Bewegungen zu unterbinden, um die Funktionsweise der Aufhängung zu optimieren. Sie verstärkt also, genau wie eine Domstrebe, das Auto von unterhalb der Karosserie aus. Wenn sie gemeinsam mit einer Domstrebe eingesetzt wird, kann die Stabilität im Fahrverhalten des Autos noch weiter verbessert werden.

Gewichtsreduktion

Die effektivste Möglichkeit, die Beschleunigungsleistung und das Brems- und Kurvenverhalten eines Autos zu verbessern, ist die Reduktion des Karosseriegewichts. Die Modifikationen reichen von grundlegenden wie dem Entfernen der Klimaanlage und der Dämmmaterialien bis hin zum Austauschen der Karosseriebleche gegen leichtere Alternativen aus Aluminium oder Kohlefaser. Im Extremfall wird die gesamte Karosserie durch Kohlefaser und das Chassis durch Aluminium ersetzt. Sie sollten jedoch immer daran denken, dass, um Steuerung und Handling des Autos nicht zu beeinträchtigen, auch die Verwindungssteifigkeit der Karosserie erhöht werden muss. Um einen niedrigen Schwerpunkt beizubehalten, ist es effizienter und effektiver, wenn Sie sich zuerst auf die Gewichtsreduzierung im oberen Teil des Autos konzentrieren.

BREMSE

KAPITEL 03 Tuning & Einstellungen

Verbesserung der Bremskraft

Verbesserungen an der Motorleistung müssen mit einer gesteigerten Bremskraft einhergehen. Das Vertrauen, wirklich Vollgas geben zu können, kann nur auf dem Wissen gründen, dass Sie ebenso effektiv bremsen können. Stärkere Bremsen bedeuten jedoch auch, dass effektivere Wege zum Umgang mit erhöhter Hitzeentwicklung gefunden werden müssen.

Die Bremskraft verstärken und Bremsschwund vermeiden

Ein getunter Motor mit einer höheren Endgeschwindigkeit erfordert ein stärkeres Bremssystem, das mehr leistet und resistenter gegen Bremsschwund ist. Im einfachsten Fall können die Bremsen durch andere Bremsbeläge verbessert werden – im extremsten Fall wird das gesamte Bremssystem gegen ein Hochleistungssystem aus dem Motorsport ausgetauscht. Sie sollten sich jedoch darüber im Klaren sein, dass die Bremssysteme von Rennwagen nicht notwendigerweise für sämtliche Situationen geeignet sind. Es ist wichtig, dass Sie Teile auswählen, die auf Ihre speziellen Anforderungen zugeschnitten sind. Sie sollten auch bedenken, dass größere Bremsbeläge oder Bremssättel die ungefederte Masse Ihres Autos erhöhen, was sich negativ auf die Manövrierbarkeit auswirken könnte. Die goldene Regel ist zwar, dass die Bremskraft immer die Motorleistung übersteigen sollte – ein zu effektives Bremssystem in einem leichtgewichtigen Auto kann aber zu einem Ungleichgewicht in seinem Fahrverhalten führen.

©GTA

Bremsbeläge

Die einfachsten Komponenten, die man beim Tuning der Bremsen verändern kann, sind die Bremsbeläge, die entscheidenden Einfluss auf die Bremskraft und die Resistenz gegen Bremsschwund haben. Die Bandbreite der angebotenen Bremsbeläge ist breit gefächert – von Belägen für die Straße bis hin zu Hochleistungs-Motorsportbelägen. Alle Beläge haben unterschiedliche optimale Betriebstemperaturen, bei denen die Bremskraft am höchsten ist, und sind unterschiedlich hitzebeständig. Die Auswahl des falschen Bremsbelags bringt möglicherweise nicht das erhoffte Resultat und kann sich sogar negativ auf das Fahrverhalten Ihres Autos auswirken. Aufgrund der verstärkten Reibung erhöhen Hochleistungsbeläge auch die Abnutzung der Bremsscheibe. Im Allgemeinen gilt: Wenn Sie die Bremsbeläge wechseln, sollten Sie alle auf einmal wechseln, um ein gleichmäßiges Bremsen zu gewährleisten.

Bremsflüssigkeit

Das ist die Flüssigkeit, die in hydraulischen Bremssystemen zum Einsatz kommt. Sie hat einen Siedepunkt von über 200 °C, um Dampfblasenbildung zu verhindern. Sie absorbiert jedoch extrem viel Feuchtigkeit, was bedeutet, dass sie sehr schnell unbrauchbar werden kann. Bremsflüssigkeiten werden über den DOT-Grad klassifiziert: Je höher der Siedepunkt, desto höher der DOT-Grad, aber auch die Tendenz, Feuchtigkeit zu absorbieren, wodurch die Flüssigkeit schnell verunreinigt (und der Siedepunkt gesenkt) wird. Aus diesem Grund muss die in Rennwagen verwendete „DOT 5"-Bremsflüssigkeit häufig ausgetauscht werden. Denken Sie daran, dass die Bremskraft nicht mit dem DOT-Grad ansteigt.

Die Bremsen aufrüsten

Bremsschläuche

Bremsschläuche sind die Leitungen, durch die die Bremsflüssigkeit fließt. Normalerweise bestehen sie aus Gummi, aber scharfes Bremsen kann sie zum Anschwellen bringen und damit das Ansprechverhalten reduzieren. Dieser Effekt kann durch den Einsatz von Stahlflex-Bremsschläuchen vermieden werden. Das sind Teflon-Schläuche, die von einem Edelstahlnetz umhüllt sind – sie verbinden die Flexibilität von Gummi mit einem erhöhten Schwellwiderstand. Sie gehören in Rennwagen mittlerweile zum Standard, um zu gewährleisten, dass die Bremsen immer optimal auf die Eingaben des Fahrers reagieren.

Bremsscheiben

Der effektivste Weg, die Bremskraft zu erhöhen, ist die Steigerung des Bremsvermögens. Hierfür werden Bremsscheiben mit größerem Durchmesser verwendet, die mehr Reibung erzeugen. Große Bremsscheiben aus Gusseisen erhöhen jedoch die ungefederte Masse, was sich negativ auf das Fahrverhalten Ihres Autos auswirken kann. Um dies zu verhindern, setzt man in letzter Zeit immer öfter leichtgewichtige Bremsscheiben aus Keramik und Carbon ein. Da Bremsscheiben sich durch häufigen Gebrauch abnutzen, müssen sie regelmäßig ersetzt oder überholt werden, um ihre Bremskraft zu erhalten.

Bremssättel

Das Aufrüsten der Bremssättel geht häufig mit einem Austausch des gesamten Bremssystems einher. Normale Bremssättel pressen die Bremsbeläge nur von einer Seite gegen die Bremsscheibe. Eine Art, sie aufzurüsten, ist, sie durch Gegenkolben-Bremssättel zu ersetzen, die von beiden Seiten gegen die Bremsscheibe drücken. Manche Serienwagen sind heutzutage bereits mit Bremsen mit sechs Bremskolben ausgestattet, da die größere Anzahl der Kolben einen einheitlicheren Anpressdruck auf die Bremsscheibe gewährleistet und damit die Bremskraft erhöht. Gegenkolben-Bremssättel werden aus einem einzelnen Stück gefertigt und die hohe Verwindungssteifigkeit des Sattels selbst ermöglicht stabiles Bremsen, auch unter schwierigen Bedingungen.

AUFHÄNGUNG

KAPITEL 03 Tuning & Einstellungen

Die Aufhängung verbessern

In anspruchsvollen Fahrsituationen ist es von größter Bedeutung, sich auf eine gut getunte Aufhängung verlassen zu können, die Stabilität garantiert und die Wendigkeit erhöht. Ein Tuning der Aufhängung kann den Charakter Ihres Autos vollständig verändern.

Anpassung der Handling-Charakteristika

Der geschwindigkeitssteigernde Effekt eines Tunings der Aufhängung auf sportliches Fahren geht auf Kosten eines Teils des Fahrkomforts. Auf einem ebenen Untergrund, etwa auf einer Rennstrecke, sorgt eine möglichst tief liegende Karosserie für einen tiefen Schwerpunkt und ein stabiles Fahrverhalten. Eine härtere Aufhängung unterbindet während der Beschleunigung, dem Abbremsen und bei Kurvenfahrten unnötige Bewegungen und garantiert so ein äußerst direktes Handling. Bewegt sich die Aufhängung jedoch überhaupt nicht, kann das Auto Lastverlagerungen nicht effektiv ausgleichen, was zu sehr schlechten Fahreigenschaften führt. Die beste Lösung ist, die Aufhängung härter einzustellen und sich dabei vor Augen zu halten, bis zu welchem Grad mögliche Lasten sich in alle vier Richtungen verlagern können müssen. Abhängig von Ihrem Fahrzeug und der Oberfläche, auf der Sie fahren, müssen Sie die Aufhängung manchmal weicher einstellen, um die Bodenhaftung zu verbessern.

Stoßdämpfer

Ziel des Aufrüstens der Stoßdämpfer ist es, eine höhere Dämpfkraft als bei Standarddämpfern zu erhalten, die vor allem auf Fahrkomfort ausgelegt sind. Dadurch kann die Stabilität auch bei hohen Geschwindigkeiten und unter großen Lasten garantiert werden, was letztlich eine bessere Kontrolle ermöglicht. Das Ersetzen und Tunen von Stoßdämpfern sollte in der Regel zeitgleich mit dem Tuning der Federn erfolgen.

Federn

Die Federn verbessern das Handling, indem sie dazu beitragen, einen niedrigen Schwerpunkt zu erreichen. Außerdem sind sie von großer Bedeutung für die Stabilität, da sie der Wankbewegung bei Kurvenfahrten, dem Absenken der Fahrzeugfront beim Bremsen und dem Anheben der Front beim Start aus dem Stand und beim Beschleunigen entgegenwirken.

Höhenverstellbare Aufhängung

Der gebräuchlichste Typ einer höhenverstellbaren Aufhängung ermöglicht eine Anpassung des Bodenabstands mithilfe von Stoßdämpfern mit variabler Federlänge, die gleichzeitig eine Anpassung der Dämpfkraft ermöglichen. Auf diese Weise kann die Aufhängung präzise an jede Situation angepasst werden. Es gibt verschiedene Methoden, die Höhe der Aufhängung anzupassen – einschließlich Stellschrauben, C-Ringe und dem Einsatz von Klammern.

Das gewünschte Handling erreichen

Querstabilisatoren

Härtere Querstabilisatoren können dazu beitragen, die Wankbewegung bei Kurvenfahrten weiter zu reduzieren. Wird der vordere Querstabilisator härter eingestellt, nimmt das Untersteuern zu, und wird der hintere Querstabilisator härter eingestellt, nimmt das Übersteuern zu.

Buchsen

Durch die Verwendung stabilerer Buchsen an den Stoßdämpfern, Aufhängungsverbindungen und anderen Befestigungspunkten der Karosserie sowie an verschiedenen Gestängeverbindungen können unnötige Bewegungen der Aufhängung reduziert und das lineare Handling sowie das Ansprechverhalten der Lenkung verbessert werden. Die Buchsen der Aufhängung bestehen in der Regel aus harzbasierten Materialien wie Gummi oder Polyurethan, aber es gibt auch Domlager-Buchsen, die im beweglichen Teil eine Metallkugel verwenden.

REIFEN

Aufrüsten auf Hochleistungsreifen

Hochleistungsreifen sind ein zweischneidiges Schwert, da sie die Bodenhaftung enorm verbessern, doch gleichzeitig unheimlich schwer zu kontrollieren sind, wenn ihre Leistungsgrenze überschritten wird. Die Reifen müssen sorgfältig ausgewählt werden und es muss bedacht werden, wie sie die Fahrzeugleistung und andere Eigenschaften des Autos beeinflussen.

©GTA

Breite

Die Reifen zu verbreitern, heißt, die Oberfläche des Reifens, die Kontakt mit dem Boden hat, zu vergrößern. Dadurch wird auch die Bodenhaftung erhöht. Doch die Bodenhaftung wird nicht nur durch Fläche des Bodenkontakts des Reifens bestimmt, sondern auch durch die Last, die auf dem Reifen liegt. Daher wird die Bodenhaftung unter Umständen nicht sonderlich verbessert, wenn man extrabreite Reifen an ein leichtgewichtiges Fahrzeug anbringt, da nicht genug Gewicht auf sie drückt. Ein weiteres Problem kann auftreten, wenn zu große Reifen an einem untermotorisierten Fahrzeug montiert werden, da zu viel Leistung darauf verwendet wird, der Haftung der Reifen entgegenzuwirken, wodurch Geschwindigkeit verloren geht. Aus diesen Gründen sollte die Wahl der Reifengröße auf dem Gewicht und der Leistung des Fahrzeugs basieren.

Verbesserte Bodenhaftigkeit/Steifigkeit

Bodenhaftung und Steifigkeit sind die zwei wichtigsten Eigenschaften von Hochleistungsreifen.

Slicks – speziell für Rennen entwickelte Reifen – vereinen beides in Perfektion. Die Gummimischung, aus der sie bestehen, bietet eine hervorragende Bodenhaftung, da sie bei Erwärmung leicht anschmilzt und somit an der Streckenoberfläche klebt. Die Steifigkeit des Teils der Reifen mit Straßenkontakt wird dadurch erreicht, dass die die Lauffläche kein Profil besitzt. Hochleistungsreifen für die Straße zeichnen sich durch einen vergleichbaren, aber weniger extremen Ansatz aus. Für sie wird eine weichere Gummimischung verwendet und das Reifenprofil besteht aus sehr flachen Rillen. Auf nassen Oberflächen sind Rillen wichtig, um sicherzustellen, dass das Wasser effizient abgeleitet wird. Je mehr Rillen vorhanden sind und je tiefer sie sind, desto besser funktioniert das. Deshalb ist es bei der Auswahl von Reifen sehr wichtig, zu entscheiden, wie man Eigenschaften bei nassen und trockenen Bedingungen gewichtet.

Effektive Bodenhaftung auf der Straße

Niederquerschnittsreifen

Das Profil (oder Querschnittsverhältnis) eines Reifens beschreibt die Höhe im Verhältnis zu seiner Breite. Mit der Verwendung von Niederquerschnittsreifen kann man die Radgröße erhöhen, ohne den Durchmesser zu vergrößern. Das heißt auch nicht automatisch, dass auch die Breite vergrößert wird. Einer der größten Vorteile von Niederquerschnittsreifen liegt darin, dass sich die kürzere Seitenwand während des Kurvenfahrens und des Bremsens weniger verbiegt. Diese erhöhte Steifigkeit führt zu einer verbesserten Lenkreaktion und zu leichterem Handling. Allerdings geht mit dem Einsatz von Niederquerschnittsreifen ein größeres Rad einher. Das kann, wenn es zu weit getrieben wird, eine größere ungefederte Masse bedeuten, was sich wiederum negativ auf die Lenkfähigkeit auswirken kann. Im Rennsport werden größere Räder und Niederquerschnittsreifen verwendet, da größere Räder Platz für größere, effektivere Bremsen bieten.

Gummimischung

Das Gummi, dass für den Teil des Reifens verwendet wird, der im Kontakt mit dem Boden steht, wird Gummimischung genannt. Die Gummimischung bestimmt die Bodenhaftung der Reifen. Für Hochleistungsreifen, die auf eine sehr gute Bodenhaftung ausgelegt sind, wird eine weiche Mischung verwendet, die besser am Straßenbelag haftet. Rennreifen schmelzen sogar ein bisschen bei Hitze, sodass sie noch besser am Straßenbelag haften. Weiche Mischungen bieten einen besseren Grip, doch sie nutzen sich schneller ab. Harte Mischungen sind langlebiger. Es ist sehr wichtig, die Eigenschaften der Mischung zu kennen, um den richtigen Reifen zu wählen. Fahrer sollten sich zudem bewusst sein, dass Gummi mit der Zeit härter wird und dass neue Reifen dadurch allmählich an Bodenhaftung verlieren – vor allem die Reifen, die aus weicheren Mischungen bestehen.

Laufflächenprofil

Die in die Oberfläche des Reifens geschnittenen Rillen sind als Laufflächenprofil (oder Reifenprofil) bekannt und so gestaltet, dass sie die Bodenhaftung des Reifens auch bei Nässe ermöglichen, indem sie die Oberfläche des Reifens von Wasser befreien. Doch bei trockener Fahrbahn reduzieren diese Rillen die Steifigkeit, und können dazu führen, dass die Reifenoberfläche bei starker Last, etwa bei Kurvenfahrten, beim Bremsen oder beim Beschleunigen, schwankt. Deswegen haben die für Rennen verwendeten Slicks gar keine Rillen und für Semi-Rennreifen wird eine minimale Anzahl an möglichst flachen Rillen verwendet, um die Steifigkeit zu erhalten.

SPOILER

KAPITEL 03 Tuning & Einstellungen

Verbesserung der Aerodynamik

Die Verbesserung der Aerodynamik ist eine wichtige Maßnahme zur Verbesserung der Hochgeschwindigkeitsleistung. Unsachgemäßes Tuning kann zu mehr Problemen als Verbesserungen führen – man muss die Verbesserung der Aerodynamik also sehr sorgfältig vornehmen.

Den Wind nutzen

Aerodynamisches Tuning

Aerodynamische Karosserieteile (Spoiler) werden oft nur aus optischen Gründen eingesetzt. Wenn man sie jedoch richtig verwendet, können sie ein wichtiger Bestandteil sein, um das Tuning eines Fahrzeugs zur Perfektion zu bringen. Ein gutes aerodynamisches Tuning wird den Luftwiderstand verringern, der die Geschwindigkeit reduziert, und die Auftriebskräfte, die die Karosserie vom Boden heben, im Rahmen halten. Hierdurch wird die Fahrleistung enorm verbessert. Der Abtrieb, der durch die Spoiler erzeugt wird, ist essenziell für die Stabilität und die Maximierung der Bodenhaftung der Reifen und sorgt für eine bessere Fahrzeugkontrolle. Gleichzeitig muss das aerodynamische Tuning auf die Aufhängung und das gesamte Auto abgestimmt werden, da es nicht ungewöhnlich ist, dass unsachgemäßes Tuning die Fahrleistung am Ende sogar beeinträchtigt.

Frontspoiler

Der Frontspoiler ist so gestaltet, dass er den Luftstrom unter dem Fahrzeug drosselt, wodurch der Auftrieb verringert wird. Doch in einigen, wenigen Fällen können schlecht gestaltete Teile unter dem tief liegenden Auto für einen Hochdruckluftstrom in dem engen Raum zwischen Auto und Boden sorgen und so den Auftrieb fördern, statt ihn zu unterdrücken. Im schlimmsten Fall kann dies zu einem kompletten Kontrollverlust führen.

Heckstoßstangenspoiler

Der Heckstoßstangenspoiler ist so gestaltet, dass er die Form der hinteren Stoßstange optimiert, Luftwirbel hinter dem Auto verhindert und einen gleichmäßigen Luftstrom sicherstellt. Die hintere Stoßstange und der Heckstoßstangenspoiler können als einziges Teil hergestellt werden oder der Spoiler als ein zusätzliches Teil an der Unterseite der Stoßstange angebracht werden. Ersteres wird als Heckstoßstangenspoiler und Letzteres als hinterer Unterspoiler oder Heckschürze bezeichnet.

Heckflügel

Die Heckflügel werden auf dem oberen Hinterteil der Karosserie montiert. Die Heckflügelspoiler stellen sicher, dass der Luftstrom gleichmäßig um das Fahrzeug herumgeht, und sie verhindern Luftwirbel. Die Form der Spoiler ist zudem so gestaltet, dass sie dem Auftrieb entgegenwirken. Je größer sie sind, desto mehr Abtrieb wird erzeugt, und die Bodenhaftung der Hinterreifen wird verbessert.

Seitenspoiler

Seitenspoiler werden auch Seitenschürze oder Seitenschweller genannt. Sie werden rechts und links an der unteren Seite der Karosserie angebracht. Sie verringern den Luftwiderstand, der an der Seite des Fahrzeugs auftritt.

Heckdiffusor

Heckdiffusoren werden unterhalb der Heckstoßstange angebracht und erzeugen einen negativen Druck, indem sie an der Fahrzeugunterseite effizient die Luft ableiten, wodurch der Abtrieb erhöht wird. Sie werden oftmals für Rennwagen verwendet. Je kleiner die Lücke zwischen dem Diffusor und der Straße, desto größer ist der Effekt.

Einstellungen entsprechend der Fahrzeugeigenschaften ändern

Die möglichen Abstimmungen eines Fahrzeugs durch das Tuning sind so vielfältig wie die Fahrzeuge selbst. Bei den Unterschieden zwischen den Autos kann das Antriebslayout einen der größten Effekte auf das Handling und das Fahrzeugverhalten haben. Es ist wichtig, dass man versteht, wie die verschiedenen Ausstattungen reagieren, bevor man Anpassungen vornimmt.

Antriebslayout

Das Antriebslayout beschreibt die Position des Motors – der schwerste Teil eines Fahrzeugs – und der Räder, die der Motor antreibt. Verschiedene Antriebslayouts verfügen über verschiedene Vorteile und Nachteile. Selbst in stark getunten Fahrzeugen bleibt das Antriebslayout ein enormer Faktor, da es einen direkten Einfluss auf Handling und Reaktion des Fahrzeugs hat. Die Änderung des Antriebslayouts ist nicht einfach, es ist aber möglich, ein bestimmtes Layout fein abzustimmen, um die guten Eigenschaften hervorzuheben und die schlechten zu unterdrücken. Mit einem Setup, das auf clevere Weise das vorhandene Antriebslayout, die Aufhängung und die aerodynamischen Eigenschaften nutzt und verbessert, kann man ein Handling der Extraklasse erhalten.

FR - Frontmotor/Heckantrieb

Bei einer guten Gewichtsverteilung bietet ein Fahrzeug mit Frontmotor und Heckantrieb eine hervorragende Kurvenlage und Stabilität.

Bei einer guten Gewichtsverteilung bietet ein Fahrzeug mit Frontmotor und Hinterradantrieb eine hervorragende Kurvenlage und Stabilität. Wenn Sie schneller fahren möchten, sollten Sie es so tunen, dass die Hinterräder mehr Traktion haben, damit das Heck beim Beschleunigen nicht ausbricht. Die Frontpartie sollte dagegen so getunt werden, dass sie dem „schiebenden Untersteuern" entgegenwirkt, das Sie von der gewünschten Ideallinie abbringen wird, wenn beim Beschleunigen vorne die Last verringert wird.

Schwachpunkte kompensieren, Stärken ausbauen

FF – Frontmotor, Frontantrieb

In einem Fahrzeug mit FF-Antriebslayout wird die gesamte Aufmerksamkeit zumeist den Vorderreifen (die für Lenkung und Antrieb verantwortlich zeichnen) geschenkt, aber Sie dürfen das Heck nicht außer Acht lassen. Auf Hochgeschwindigkeitsstrecken sollte das Heck auf zusätzliche Stabilität getrimmt werden, während auf einer Strecke mit vielen Kurven der Fokus darauf liegen muss, dass das Heck leichter ausschwenken kann, wenn man vom Gas geht, um schärfere Kurvenfahrten zu ermöglichen. Fahrzeuge mit FF-Antriebslayout verwenden normalerweise ein 1-Weg-Sperrdifferenziale, die nur bei Beschleunigung aktiviert werden.

MR – Mittelmotor, Heckantrieb

Durch die Anordnung des Motors in Richtung Fahrzeugmitte wird gutes Beschleunigen und Abbremsen ermöglicht. Scharfe Kurven sind ebenfalls möglich, aber wenn das Fahrzeug an seine Grenzen gebracht wird, kann die geringere Last vorne zum Untersteuern führen. Das Ausbrechen des Hecks erfolgt ebenfalls sehr schnell und ist schwer zu kontrollieren. Beim Tunen sollte auf die Gewährleistung guter Lenkeigenschaften bei der Kurveneinfahrt geachtet werden und auf die Verbesserung der Traktion beim Beschleunigen aus der Kurve. Der Abtrieb vorne und hinten sollte ebenfalls sorgfältig aufeinander abgestimmt werden.

RR – Heckmotor, Heckantrieb

Eine Kombination aus hinten verbautem Motor und Heckantrieb ermöglicht großartiges Beschleunigen und Abbremsen. Doch hier ist die Front sogar noch leichter als bei einem MR-Antriebslayout, sodass das Untersteuern bei Kurvenfahrten sogar noch ausgeprägter ist. Wenn das Fahrzeug in einer Kurve an seine Grenzen gebracht wird, verhält sich das schwere Heck wie ein Pendel und schwenkt sehr stark aus, wodurch es zu plötzlichem Übersteuern kommt. Das Tuning dieses Antriebslayouts konzentriert sich normalerweise auf die Verbesserung des anfänglichen Einlenkverhaltens beim Einfahren in eine Kurve.

Allradantrieb

Das Fahrzeugverhalten hängt hier vom Antriebslayout ab, auf dem der Allradler basiert, doch im Allgemeinen fallen Kurvenfahrten aufgrund der extrem hohen Stabilität in einem Fahrzeug mit Allradantrieb schwerer. Stabilität beim Beschleunigen aus der Kurve ist erst einmal eine sehr gute Sache, weshalb sich die Einstellungen auf das Einlenken bei der Kurveneinfahrt konzentrieren sollten. Bei den in diesen Autos eingesetzten Sperrdifferenzialen handelt es sich normalerweise um ein 1-Weg-Sperrdifferenzial vorne und um einen 2-Wege-Typ hinten.

Die Grundeinstellungen für alle Teile

Der Einbau von Hochleistungskomponenten allein wird Ihr Auto nicht schneller machen. Nur über die Abstimmung der Einstellungen mit Blick auf die Ausgeglichenheit des Autos insgesamt kann das volle Potenzial der einzelnen Komponenten ausgeschöpft werden und die Gesamtleistung des Autos gesteigert werden.

Aufhängung
[Bodenabstand/Federrate]

Das Verhalten des Autos ändern

Wenn die Straßenverhältnisse gut und die Oberfläche eben sind, ist der Schwerpunkt des Autos umso niedriger, je niedriger der Bodenabstand eingestellt wird. Dadurch wird das Nicken beim Beschleunigen sowie beim Abbremsen verringert und die Fliehkraft in Kurven reduziert, was in einer insgesamt besseren Leistung resultiert. Außerdem kann das Verhalten des Autos feinjustiert werden, indem Sie die vordere und hintere Aufhängung unterschiedlich hoch einstellen. Stellen Sie die vordere Aufhängung zum Beispiel niedriger ein als die hintere, werden die Vorderreifen beim Eintritt in eine Kurve stärker auf die Fahrbahn gedrückt und das Auto lässt sich ruhiger einlenken. Bei Autos mit FF-Antriebslayout kann auf diese Weise auch dem Anheben der Fahrzeugfront beim Beschleunigen entgegengewirkt werden.

Die Federrate hat ebenfalls einen großen Einfluss auf die Bewegung des Autos. Es wird häufig angenommen, dass eine härtere Federung automatisch besser sei, aber das ist nicht immer der Fall. Eine härter eingestellte Federung kann zwar, genau wie ein geringerer Bodenabstand, nachteiligem Fahrverhalten, wie zum Beispiel Nicken, Gierbewegung und Fliehkraft, entgegenwirken, bei einer zu harten Federung wird jedoch der Rückstoß von der Straße erhöht, sodass die Reifen den Bodenkontakt verlieren können und die Traktion verringert wird. Aus diesem Grund sollte die Federrate sorgfältig eingestellt werden, damit sie genau auf Ihre Bedürfnisse abgestimmt ist.

Auch auf das Handling hat die Federrate einen großen Einfluss. Eine Erhöhung der Federrate an der Fahrzeugfront kann zum Untersteuern führen und eine Erhöhung am Heck zum Übersteuern. Darauf nimmt aber auch die Dämpfkraft der Stoßdämpfer Einfluss, weshalb man die kombinierte Wirkung dieser beiden Faktoren bedenken muss, wenn man die Aufhängungseinstellungen festlegt.

Die richtige Abstimmung der Front- und Heckfederung

Aufhängung
[Dämpfkraft]

Einstellung der Ein- und Ausfederung

Stoßdämpfer steuern die Geschwindigkeit, mit der sich die Aufhängungsfedern zusammenziehen und wieder ausdehnen, wenn eine Last auf sie einwirkt. Die Kraft, die dabei ausgeübt wird, nennt man „Dämpfkraft". Die Dämpfkraft wird durch den Widerstand erzeugt, der entsteht, wenn der Kolben sich im Öl oder Gas des Stoßdämpfergehäuses nach oben und unten bewegt. Je höher die Dämpfkraft ist, desto schneller wird die Bewegung der Federn unterdrückt. Je geringer die Dämpfkraft ist, desto länger dauert es, bis die Bewegung der Federn nachlässt.

Die Dämpfkrafteinstellungen für Ein- und Ausfederung können unabhängig voneinander vorgenommen werden, wodurch das Verhalten und das Handling des Autos präziser kontrolliert werden können. Wird die Dämpfkraft bei der Einfederung erhöht, verringern sich die Geschwindigkeit des Absenkens der Fahrzeugfront beim Bremsen, die Fliehkraft in Kurven sowie sonstige Aufbaubewegungen. Die erhöhte Steifigkeit des Fahrwerks lässt die Reifen auf holprigen Straßen jedoch schneller den Bodenkontakt verlieren und macht es schwieriger, die Lastverlagerung effektiv zu nutzen. Andererseits hilft eine Erhöhung der Ausfederungsdämpfkraft bei der Reduzierung von größeren Abweichungen in der Bewegung des Autos. Das Anheben der Fahrzeugfront beim Beschleunigen aus einer Kurve wird zum Beispiel unterdrückt, indem verhindert wird, dass die vordere Aufhängung sofort ausfedert, wodurch die Vorderreifen den Kontakt zur Straße halten.

Die Handling-Eigenschaften können auch durch eine Anpassung der Dämpfkraft bei der Ein- und Ausfederung der Vorder- und Hinterräder angepasst werden. Wird die Dämpfkraft bei der Einfederung an der Fahrzeugfront reduziert, wird ein größerer Teil des Gewichts in einer Kurve nach vorn verlagert, was die Bodenhaftung der Vorderreifen verbessert und ein Untersteuern unterdrückt. Eine Reduzierung der Dämpfkraft der Ausfederung an den Hinterrädern begünstigt ein Übersteuern, während eine Erhöhung zum Untersteuern führt. Grundsätzlich gilt, dass die Dämpfkraft der Einfederung vor der Dämpfkraft der Ausfederung eingestellt werden sollte.

Dämpfkraft an Front und Heck (Einfederung)

Hoch
Niedrig
Niedrig
Hoch

Schwerpunkt beim Untersteuern

Schwerpunkt beim Übersteuern

Aufhängung
[Spureinstellung: Radsturz]

Die positiven Auswirkungen einer negativen Radsturz-Einstellung

Die am häufigsten geänderte Spureinstellung ist der Radsturz. Ein negativer Radsturz bedeutet, dass die unteren Teile der gegenüberliegenden Räder weiter auseinander liegen als die oberen. Bei einem positiven Radsturz zeigen die unteren Teile der Räder zur Fahrzeugmitte.

In einer Kurve neigt sich das Auto wegen der Zentrifugalkraft zur Außenseite der Kurve. Um dem entgegenzuwirken, verfügen die Räder über einen negativen Radsturz, damit in Kurven ein größerer Teil der Reifenlauffläche Kontakt zum Boden hat und die Traktion verbessert wird. Mit „Erhöhung des Radsturzes" ist zumeist die Erhöhung des negativen Radsturzes gemeint.

Ein negativer Radsturz hat dennoch einige Nachteile auf geraden Strecken. Da die Reifen nicht senkrecht auf der Straße liegen, wird das Lenkverhalten leichter durch Spurrillen oder Unebenheiten der Straßenoberfläche beeinflusst und es ist schwieriger, die Traktion aufrechtzuerhalten. Durch den Winkel der Räder wird auch der Rollwiderstand erhöht, wodurch sich die Beschleunigungsleistung verringert. Zusätzlich verlängert sich der Bremsweg, da die Bodenhaftung der Reifen etwas geringer ist. Je höher der negative Radsturz eingestellt ist, desto deutlicher machen sich die negativen Auswirkungen auf Geraden bemerkbar. Drastische Veränderungen sollten daher gut durchdacht sein.

Bei einem negativen Radsturz ist es wichtig, die Gewichtsverteilung auf die Vorder- und Hinterräder in Kurven zu beachten. Wirkt eine große Last auf die Fahrzeugfront, sollte der negative Radsturz der Vorderräder erhöht und der der Hinterräder verringert werden. Das verringert das Risiko des Untersteuerns.

Ein positiver Radsturz wird so gut wie nie verwendet, da er die Bodenhaftung der Reifen verringert und die Fahrzeugbewegungen überempfindlich werden.

Positiver Sturz

Negativer Sturz

Fliehkraft in Kurven
Negativer Sturz erhöht die Bodenhaftung in Kurven.

Optimale Bodenhaftung erreichen

Aufhängung
[Spureinstellung: Spurwinkel]

Ein kleiner Winkel mit großen Auswirkungen auf die Stabilität

Der Spurwinkel ist der Winkel der Räder. Man erkennt ihn, wenn man von oben auf das Auto schaut. Er spielt eine wichtige Rolle für die Aufrechterhaltung der Stabilität, wenn es zu einer starken Verschiebung der Gewichtsverteilung zwischen der linken und rechten Seite kommt. Verschiebt sich das Gewicht zum Beispiel in einer Kurve auf das außenliegende Rad, hat Winkel dieses Rads einen großen Einfluss auf das Verhalten des Autos. Mit der Spurwinkel-Einstellung legt man diesen Winkel fest, der für die Stabilität von enormer Bedeutung ist.

„Vorspur" bedeutet, dass der vordere Teil der Räder nach innen zeigt, „Nachspur", dass er nach außen zeigt. Beim Handling bewirkt eine Vorspur-Einstellung der Vorderräder und eine Nachspur-Einstellung der Hinterräder eine Tendenz zum Übersteuern, während eine umgekehrte Einstellung ein Untersteuern begünstigt. Vorderräder sind manchmal auf Nachspur eingestellt, um ihre Bewegung in Kurven berechenbarer zu machen.

Der Spurwinkel steht in direkter Verbindung zum Radstand, zur Spurbreite, zum Radsturz und zur Motorleistung. Die Einstellung des Spurwinkels erfolgt somit oft erst zum Schluss und nur, wenn von den anderen Faktoren hervorgerufene Auffälligkeiten korrigiert oder Handling-Eigenschaften leicht angepasst werden müssen. Ein großer Spurwinkel verursacht viel Rollwiderstand, daher werden immer nur sehr kleine Änderungen vorgenommen. Insbesondere Änderungen am Spurwinkel der Hinterräder haben einen großen Einfluss auf die Fahrleistung und das Handling. Deshalb wird der Winkel der Vorderräder normalerweise zuerst eingestellt und der hintere anschließend nur leicht angepasst.

F Vorspur
Front-Ansprechverhalten → Hoch
Tendenz zum Untersteuern
H Vorspur

F Vorspur
Front-Ansprechverhalten → Hoch
Tendenz zum Übersteuern
H Nachspur

F Nachspur
Front-Ansprechverhalten → Gering
Tendenz zum Untersteuern
H Vorspur

F Nachspur
Front-Ansprechverhalten → Gering
Tendenz zum Übersteuern
H Nachspur

Aufhängung

[Querstabilisator/Stabilisatorhärte]

Der letzte Feinschliff

Ein Querstabilisator ist eine Drehstabfeder, die die unteren Arme der linken und rechten Aufhängung miteinander verbindet. Eine Drehstabfeder ist ein Metallstab, der sich den Widerstand der auf ihm platzierten Torsionskraft zunutze macht. Bewegt sich die Aufhängung auf einer Seite während der Kurvenfahrt, wirkt der Widerstand der Aufhängung auf der anderen Seite dem entgegen. Dadurch wird die Fliehkraft verringert und die Reifen haben eine größere Bodenhaftung. Die Härte dieses Stabs wird durch eine Federrate angegeben, die der einer normalen Aufhängungsfeder ähnelt. Wird die Härte des Frontstabilisators erhöht, verbessert sich auch die Lenkreaktion.

Beim Anpassen des Querstabilisators muss darauf geachtet werden, dass die Federrate nicht höher als der der Aufhängungsfeder ist. Bei einem stärkeren Querstabilisator ist die Aufhängungsfeder zu schwach, um ihm entgegenzuwirken. Wenn sich das Gewicht dann auf das äußere Rad verlagert, hebt die innere Aufhängung mit dem Querstabilisator vom Boden ab, sodass auch das innere Rad von der Straße abhebt und Traktion verliert.

Das Handling kann durch eine Änderung der Federrate der vorderen und hinteren Querstabilisatoren angepasst werden. Solche Änderungen sollten jedoch normalerweise nur durch eine Anpassung der Federrate der Aufhängungsfedern und der Dämpfkraft der Stoßdämpfer vorgenommen werden. Eine höhere Querstabilisatorhärte führt zu vielen Problemen und lässt das gewünschte Ergebnis oft in weite Ferne rücken. Daher sollten Anpassungen der Querstabilisatorhärte eher als letzter Feinschliff angesehen werden und nicht als eine Tuningtechnik an sich.

F Stark
Front-Ansprechverhalten
→ Hoch
Tendenz zum Übersteuern
H Stark

F Stark
Front-Ansprechverhalten
→ Hoch
Tendenz zum Untersteuern
H Schwach

F Schwach
Front-Ansprechverhalten
→ Gering
Tendenz zum Übersteuern
H Stark

F Schwach
Front-Ansprechverhalten
→ Gering
Tendenz zum Untersteuern
H Schwach

Antrieb
[Sperrdifferenzial]

Eine Änderung der Begrenzung verändert auch die Manövrierbarkeit

Das Anfangsdrehmoment bestimmt den Zeitpunkt, an dem das Sperrdifferenzial aktiviert wird. Je höher das Anfangsdrehmoment ist, desto leichter wird das Sperrdifferenzial angesprochen und desto besser ist das Ansprechverhalten beim Beschleunigen. Je niedriger das Anfangsdrehmoment ist, desto langsamer setzt das Sperrdifferenzial ein.

Im Allgemeinen hebt ein hohes Anfangsdrehmoment die typischen Handling-Merkmale eines Antriebslayouts hervor. Bei Autos mit Heckantrieb wird somit das Übersteuern begünstigt und bei frontgetriebenen Fahrzeugen das Untersteuern. Obwohl es die Traktion in beiden Fällen verbessert, wird das Einlenken erschwert. Anpassungen des Anfangsdrehmoments sollten daher nur mit einem im Vorfeld festgelegten erwünschten Ergebnis vorgenommen werden.

Das Verhalten des Sperrdifferenzials beim Beschleunigen und Abbremsen lässt sich ebenfalls einstellen. Die Beschleunigungseinstellung bestimmt die Effektivität des Sperrdifferenzials, wenn aufs Gaspedal getreten wird. Je höher die Einstellung ist, desto mehr Antriebsleistung wird auf die Räder übertragen und desto schneller kann das Auto durch Kurven fahren. Allerdings werden die Handling-Merkmale des Autos dadurch hervorgehoben und das Auto bei der Kurvenausfahrt richtig auszurichten, erfordert etwas Können.

Die Abbremseinstellung bestimmt die Effektivität des Sperrdifferenzials, wenn vom Gas gegangen wird. Je höher sie ausfällt, desto stabiler ist es beim Bremsen während der Einfahrt in die Kurve. So können Sie sehr schnell in die Kurve fahren, weil Sie länger bremsen können als gewöhnlich. Die eigentliche Kurvenfahrt wird dadurch allerdings erschwert, weshalb diese Einstellung nur für fortgeschrittene Fahrer gedacht ist, die gut mit dem anfänglichen Untersteuern umgehen können.

FR/MR/RR
Tendenz zum Übersteuern

FF
Tendenz zum Untersteuern

Allradantrieb, Heckmotor
Tendenz zum Übersteuern

Allradantrieb, Frontmotor
Tendenz zum Untersteuern

Anpassung des Kurvenverhaltens

Antrieb
[Übersetzungsverhältnis]

Leistungserhalt dank kurzer Übersetzung

Rennwagen sind auf vielen unterschiedlichen Strecken unterwegs. Sie kommen auf kurvenreichen Strecken, aber auch auf Höchstgeschwindigkeitskursen mit langen Geraden zum Einsatz. Um dabei auf einer bestimmten Strecke das Beste aus dem Motor herauszuholen, ist es oft notwendig, das Übersetzungsverhältnis des Antriebs zu ändern. In diesem Zusammenhang werden normalerweise sowohl das Endantriebszahnrad als auch die Zahnräder des Getriebes an sich ausgetauscht.

Sind Sie auf einer Strecke mit vielen langsamen und mittelschnellen Kurven unterwegs, sollten Sie sich eher auf die Beschleunigung aus den Kurven heraus konzentrieren als auf das Erreichen von Höchstgeschwindigkeiten. Ein Getriebe mit Zahnrädern, die ein ähnliches Übersetzungsverhältnis haben, ermöglicht es Ihnen dabei, leichter innerhalb der idealen Leistungskurve zu bleiben. Man nennt das auch „kurze Übersetzung".

Fahren Sie hingegen auf einer Strecke mit vielen langen Geraden, die hohe Geschwindigkeiten erfordern, sollten Sie ein Getriebe verwenden, das ein kleineres Übersetzungsverhältnis für den fünften und sechsten Gang verwendet. Das wird auch als „lange Übersetzung" bezeichnet.

Das Übersetzungsverhältnis des Endantriebszahnrads hat Einfluss darauf, wie sich das Getriebe als Ganzes verhält. Wenn das Endantriebszahnrad verkleinert und die anderen Zahnräder beibehalten werden, wird die Beschleunigung verbessert und die Endgeschwindigkeit verringert. Bei einem größeren Endantriebszahnrad wird die Endgeschwindigkeit hingegen auf Kosten der Beschleunigung erhöht. Wenn Sie zum ersten Mal die Größe der Zahnräder anpassen, sollten Sie sich der Einfachheit halber auf das Endantriebszahnrad beschränken. Das Zahnrad sollte so gewählt werden, dass der Motor die Drehzahlgrenze im letzten Gang des Getriebes erreicht – genau am Ende einer Geraden.

Auf einer Strecke mit vielen Kurven sollte das Übersetzungsverhältnis aller Zahnräder nah beieinander liegen, um die Beschleunigungsleistung zu erhöhen.

Auf Hochgeschwindigkeitsstrecken mit langen Geraden bewirkt ein höheres Übersetzungsverhältnis eine erhöhte Höchstgeschwindigkeit.

Aerodynamik
[Abtrieb]

Verbesserung der Hochgeschwindigkeitsleistung

Die Auswirkungen, die Luft auf das Fahren mit Höchstgeschwindigkeit hat, können unmöglich ignoriert werden. Im Großen und Ganzen lassen sich diese Auswirkungen in zwei Kategorien unterteilen: Luftwiderstand, der die Höchstgeschwindigkeit einschränkt, und Auftrieb, bei dem die Luftbewegung das Auto von der Fahrbahn hebt. Diese beiden Faktoren stehen in enger Beziehung zueinander. Verringert man den Luftwiderstand, verstärkt das den Auftrieb. Verringert man den Auftrieb, erhöht sich wiederum der Luftwiderstand. Deshalb muss die richtige Balance zwischen beiden gefunden werden.

Beim Tuning liegt der Schwerpunkt hinsichtlich der Luftbewegungen auf einer bestmöglichen Nutzung des Abtriebs. Der Abtrieb ist die Kraft, die ausgeübt wird, wenn der Luftwiderstand das Auto auf die Straße drückt und dadurch den Bodenkontakt verstärkt. Ein erhöhter Abtrieb verringert zwar die Höchstgeschwindigkeit, erhöht dafür aber die Stabilität und Geschwindigkeit des Autos in der Kurvenfahrt – besonders in Hochgeschwindigkeitskurven. Wird der Abtrieb vermindert, verringert sich auch die Geschwindigkeit in Kurven. Im Gegenzug wird dafür aber die Geschwindigkeit auf der Geraden erhöht.

Wie viel Abtrieb benötigt wird, hängt von der Art der Strecke ab. Auch wenn es so erscheinen mag, ist ein hoher Abtrieb von Beginn an nicht immer die beste Wahl. Die ideale Methode für das Fahrzeugsetup ist es, verschiedene Einstellungen mit geringem Abtrieb vorzunehmen und ihn dann je nach Bedeutung der Hochgeschwindigkeitskurven schrittweise zu erhöhen. Bei einem Auto mit kleinerem Hubraum ist der beste Ansatz normalerweise, die Höchstgeschwindigkeit zu maximieren, indem man den Abtrieb auf null verringert.

Der an der Front und am Heck wirkende Abtrieb kann auch für die Veränderung der Handling-Eigenschaften in Hochgeschwindigkeitskurven genutzt werden. Bei einem höheren Abtrieb an der Fahrzeugfront, erhöht sich auch die Bodenhaftung der Vorderreifen, was ein Übersteuern begünstigt. Ein höherer Abtrieb am Heck hat genau den gegenteiligen Effekt und begünstigt ein Untersteuern. Anpassungen dieser Art können auf Hochgeschwindigkeitsstrecken den Unterschied ausmachen.

Höchstgeschwindigkeit → wird erhöht
Kontrolle → verschlechtert sich

Höchstgeschwindigkeit → wird leicht verringert
Tendenz zum Untersteuern

Höchstgeschwindigkeit → wird leicht erhöht
Tendenz zum Übersteuern

Höchstgeschwindigkeit → wird verringert
Kontrolle → verbessert sich

SITUATIONEN

KAPITEL 03 Tuning & Einstellungen

Einstellungen für bestimmte Situationen

Ein wichtiger Grund, die Einstellungen Ihres Autos zu verändern, ist die Anpassung des Fahrzeugs auf die Anforderungen bestimmter Rennstrecken oder bestimmter Bedingungen. Ein paar schnelle Handgriffe an der Aufhängung und am Antrieb können das Handling auf der jeweiligen Strecke überraschend stark verändern.

Hochgeschwindigkeitsstrecken

Verbesserung der Höchstgeschwindigkeit

Die idealen Einstellungen für eine Hochgeschwindigkeitsstrecke sind jene, die es dem Auto ermöglichen, Hochgeschwindigkeitskurven so schnell wie möglich zu durchfahren. Aufhängung und Stoßdämpfer sollten hart und der Bodenabstand niedrig sein. Ist der Bodenabstand allerdings so niedrig, dass den Federn nicht genug Raum bleibt, ist die Aufhängung zu hart, um Stöße durch Bodenwellen und Schlaglöcher in der Straße zu absorbieren – d. h. mögliche vorteilhafte Effekte werden aufgehoben. Wenn Sie härtere Federn verwenden und die Härte der Querstabilisatoren reduzieren, erhalten Sie eine leichte Wankbewegung, die den Rädern einen besseren Bodenkontakt ermöglicht. Stellen Sie andererseits die Federn ein wenig weicher ein, um sie an die unebene Straßenoberfläche anzupassen, wirken verstärkte Querstabilisatoren einer übermäßigen Wankbewegung entgegen. Im Prinzip kompensieren also die Querstabilisatoren die Defizite Ihrer Federn.

Die Spureinstellung ist ebenfalls von großer Bedeutung. Durch eine Erhöhung des hinteren Vorspurwinkels können Sie die Stabilität verbessern. Der Radsturz sollte zumindest leicht negativ sein, aber der Reifen soll natürlich auch so viel Oberflächenkontakt haben wie möglich, wenn Sie mit hoher Geschwindigkeit auf der Geraden fahren und wenn Sie hart auf die Bremse treten – deshalb sollten Sie es nicht übertreiben.

Was das Übersetzungsverhältnis angeht, lautet das Ziel wie immer: das Auto so lange wie möglich im optimalen Drehzahlband halten. Das Endantriebszahnrad sollte so eingestellt werden, dass der höchste Gang am Ende von langen Geraden gerade den roten Bereich erreicht. Der Abtrieb sollte so gering wie möglich gehalten werden, um die Geschwindigkeit auf der Geraden zu maximieren – Sie müssen aber sicherstellen, dass die Stabilität in Kurven und beim Bremsen nicht verloren geht.

Empfohlene Aufhängungseinstellungen

		FRONT	HECK
Bodenabstand		Niedrig	Niedrig
Stoßdämpfer	Ausfederung	Stark	Stark
	Einfederung	Stark	Stark
Federrate		Hart	Hart
Spureinstellung	Spur	0	Vorspur
	Radsturz	Negativ	0
Querstabilisator		Hart	Hart

※Je nach Auto können einige dieser Einstellungen unter Umständen nicht möglich sein.

Die beste Leistung erreichen

Technische Rennstrecken

Die Motorleistung effektiv auf die Straße bringen

Bei einer technisch anspruchsvollen Strecke mit vielen engen Kurven muss das Auto so eingestellt werden, das es schnell einlenkt und die Fähigkeit hat, mit einem minimalen Leistungsverlust aus den Kurven heraus beschleunigen zu können. Das Erste, was man hierfür tun muss, ist die Anpassung des Bodenabstands an die Strecke – das heißt, so niedrig wie möglich, ohne Probleme zu verursachen.

Die vorderen Federn sollten weicher, die hinteren härter eingestellt werden (in Autos mit Heckantrieb nur moderat), um ein besseres Kurvenverhalten zu gewährleisten. Die Stoßdämpfer sollten für dasselbe Ziel optimiert werden. Die Vorderräder sollten eine leichte Vorspur aufweisen, wenn der Fahrer bei Kurvenfahrten großen Wert auf ein anfängliches Ansprechverhalten legt – aber weniger Vorspur, wenn die Betonung auf das Fahrgefühl beim und nach dem Scheitelpunkt gelegt werden soll. Negativer Sturz sollte in Maßen zum Einsatz kommen, da die Traktion beim Bremsen und Kurvenfahren beibehalten werden soll.

Das Getriebe sollte kurz übersetzt werden – mehr um die Drehzahl beizubehalten als um Wert auf die Höchstgeschwindigkeit zu legen – und das Übersetzungsverhältnis des Endantriebszahnrades sollte niedrig sein, um eine schnelle Beschleunigung zu ermöglichen.

Wenn ein komplettes Motortuning möglich ist, sollte der Fokus eher auf dem maximalen Drehmoment bei niedrigen und mittleren Geschwindigkeiten liegen, um schnell aus Kurven heraus beschleunigen zu können, als auf einer Maximalleistung bei hohen Drehzahlen. Der Abtrieb vorn und hinten sollte so hoch wie möglich sein, da die Aerodynamik des Autos die Kurvenstabilität unterstützen und nicht die Höchstgeschwindigkeit verbessern sollte.

Empfohlene Aufhängungseinstellungen

		FRONT	HECK
Bodenabstand		Niedrig	Hoch
Stoßdämpfer	Ausfederung	Stark	Schwach
	Einfederung	Stark	Schwach
Federrate		Hart	Weich
Spureinstellung	Spur	0	Vorspur
	Radsturz	0	0
Querstabilisator		-	-

※Je nach Auto können einige dieser Einstellungen unter Umständen nicht möglich sein.

Dem Untersteuern entgegenwirken

Verstehen, warum das Auto nicht mehr einlenken kann

Zuerst sollten Sie erkennen, wann es zum Untersteuern kommt: Bei der Einfahrt in eine Kurve, in der Nähe des Scheitelpunkts oder beim Herausbeschleunigen?

Untersteuert das Auto bei der Einfahrt in eine Kurve, muss die Bodenhaftung der Vorderreifen so stark wie möglich verbessert werden. Das kann erreicht werden, indem die Federn der vorderen Aufhängung weicher gemacht und die Ausfederung des Stoßdämpfers erweitert wird, während die Einfederung verringert wird, um einen Lastwechsel nach vorn zu ermöglichen.

Ebenso wie die Aufhängungseinstellungen betreffende Faktoren kann auch ein übersensibles Sperrdifferenzial ein Untersteuern in diesem Bereich der Kurve bewirken. Hier kann man durch einen niedrigeren Sperrwert und ein reduziertes Anfangsdrehmoment Abhilfe schaffen. Wenn Sie ein 2-Wege-LSD (das wirksam ist, egal ob das Gaspedal getreten wird oder nicht) in einem Auto mit Heckantrieb verwenden, sollten Sie dieses gegen ein 1-Weg-System austauschen, das beim Abbremsen nicht aktiv wird. Auf Rennstrecken mit Hochgeschwindigkeitskurven kann auch eine Erhöhung des vorderen Abtriebs Erfolg zeitigen, da auf diese Weise die Bodenhaftung der Vorderräder verbessert wird.

Wenn es zu Untersteuern kommt, wenn Sie sich dem Scheitelpunkt der Kurve nähern, sollte der negative Radsturz erhöht werden, um zu gewährleisten, dass der Reifen mehr Bodenkontakt hat. Eine Verringerung der Vorspur der Hinterräder kann für eine ausgewogenere Bodenhaftung sorgen. Falls möglich kann auch eine Erhöhung der Spurbreite der Vorderräder wirksam sein.

Sollte das Untersteuern in einem Auto mit Heckantrieb bei der Beschleunigung aus einer Kurve heraus auftreten, kann man ihm durch eine Verringerung des Bodenabstands vorn, eine Erhöhung der Dämpfkraft der Ausfederung an den vorderen Stoßdämpfern und eine Erhöhung der Dämpfkraft der Einfederung an der Hinterachse entgegenwirken. Sollte es in einem Auto mit FF-Antriebslayout auftreten, kann man es mit einer Erhöhung der Wirkung des Sperrdifferenzials bekämpfen.

Empfohlene Aufhängungseinstellungen

		FRONT	HECK
Bodenabstand		Niedrig	Hoch
Stoßdämpfer	Ausfederung	Stark	Stark
	Einfederung	Schwach	Stark
Federrate		Weich	Hart
Spureinstellung	Spur	Vorspur	0
	Radsturz	Negativ	0
Querstabilisator		Weich	Hart

※Je nach Auto können einige dieser Einstellungen unter Umständen nicht möglich sein.

Dem Übersteuern entgegenwirken

Das Problem mit dem Heckantrieb

Bei Fahrzeugen mit FF- oder Allrad-Antriebslayout kommt es selten zum Übersteuern – dieses Problem betrifft fast ausschließlich Autos mit Heckantrieb.

Wenn Sie einfach nur die maximale Kontrolle über das Übersteuern haben möchten (z. B. bei Drift-Veranstaltungen), dann sollten Sie die Aufhängung vorn und hinten härter einstellen, um mehr Kontrolle darüber zu bekommen, wie stark das Heck ausbricht. In einem Zeitrennen oder einer ähnlichen Rennveranstaltung müssen Sie Maßnahmen zum Erhalt der Traktion ergreifen, damit sich das Auto weiter vorwärts bewegt.

Der Hauptgrund für ungewolltes Übersteuern ist der Verlust der Traktion an den Hinterrädern beim Gasgeben, was bewirkt, dass die Antriebskraft auf die seitliche Bewegung verschwendet wird, anstatt das Auto zu beschleunigen.

Die Federrate und die Dämpfkraft können getunt werden, um diesem Effekt zu begegnen. Die hinteren Federn sollten weicher eingestellt und die Dämpfkraft der Stoßdämpfer sollte für das Einfedern reduziert und für das Ausfedern erhöht werden. Es kann auch von Vorteil sein, die Härte des hinteren Querstabilisators zu reduzieren, um den Lastwechsel auf das Innenrad zu verstärken. Falls möglich sollte die Spurbreite hinten ebenfalls erhöht werden. Sollte die vordere Aufhängung zu weich eingestellt sein, kann sich Gewicht von hinten zu leicht nach vorn verlagern, also muss man die vordere Aufhängung härter einstellen, um die Bodenhaftung am Heck zu erhöhen.

Ist ein Heckspoiler vorhanden, sollte der Winkel erhöht werden, um den Abtrieb zu erhöhen. Das bedeutet jedoch auch geringfügige Einbußen bei der Höchstgeschwindigkeit.

Empfohlene Aufhängungseinstellungen

		FRONT	HECK
Bodenabstand		Hoch	Niedrig
Stoßdämpfer	Ausfederung	Stark	Stark
	Einfederung	Stark	Schwach
Federrate		Hart	Weich
Spureinstellung	Spur	-	Vorspur
	Radsturz	-	Negativ
Querstabilisator		-	Weich

※Je nach Auto können einige dieser Einstellungen unter Umständen nicht möglich sein.

Nasse Bedingungen

Das Beste aus den Reifen herausholen

Wie Sie vielleicht erwartet haben, nimmt der Reibungskoeffizient (µ) der Straßenoberfläche bei Regen ab – und mit ihm auch die Bodenhaftung. Werfen wir einen Blick auf mögliche Einstellungen, die angepasst werden können, um mit nassen Bedingungen besser umgehen zu können.

Federrate, Dämpfkraft und Härte des Querstabilisators sollten alle niedriger eingestellt werden als bei trockenen Bedingungen – in manchen Fällen kann der hintere Querstabilisator vollständig entfernt werden. Eine harte Aufhängung erschwert es den Rädern, optimalen Bodenkontakt zu halten, und kann ein plötzliches Ausbrechen des Autos bewirken. Eine harte Aufhängung verbessert den Grip, wenn die Haftung der Straße gut ist, aber unter nassen Bedingungen, bei denen die Bodenhaftung schlecht ist, ist eine weiche Aufhängung besser. Der Radsturzwinkel sollte etwas kleiner sein als unter trockenen Bedingungen, um zu garantieren, dass bei Beschleunigung und Abbremsen mehr Reifenfläche Bodenkontakt hält. In Fahrzeugen, die aerodynamische Anpassungen ermöglichen, sollte der vordere und hintere Abtrieb erhöht werden, um die Bodenhaftung zu maximieren.

Eine der einfachsten Optimierungen bei nassem Wetter ist die Anpassung des Reifendrucks. Wenn Sie bei starkem Regen den Reifendruck erhöhen, verringern Sie den Kontakt des Reifens mit der Oberfläche, wodurch die Last auf dem Teil des Reifens, der den Boden berührt, verstärkt und auf diese Weise ein mögliches Aquaplaning verhindert wird. Bei leichtem Regen kann jedoch eine Verringerung des Reifendrucks die Fahrleistung verbessern. Die Veränderung des Luftdrucks vorn und hinten ist eine schnelle und einfache Möglichkeit, Einfluss auf die Bodenhaftung zu nehmen, und gehört in der Regel zu den ersten Maßnahmen, die ergriffen werden sollten.

Falls ein komplettes Motortuning möglich ist, sollte das Hauptaugenmerk auf dem Drehmoment im niedrigen bis mittleren Drehzahlbereich statt auf der Leistung am oberen Ende liegen. Wenn Sie sich mehr auf elektronische Fahrhilfen verlassen, können die Fahrleistungen bei Regen ebenfalls verbessert werden – und es ist überraschend, zu sehen, welch einen Unterschied ein elektronisches Bremssystem machen kann.

Empfohlene Aufhängungseinstellungen

		FRONT	HECK
Bodenabstand		Niedrig	Niedrig
Stoßdämpfer	Ausfederung	Schwach	Schwach
	Einfederung	Schwach	Schwach
Federrate		Weich	Weich
Spureinstellung	Spur	Vorspur	Vorspur
	Radsturz	Negativ	Negativ
Querstabilisator		Weich	Weich

※Je nach Auto können einige dieser Einstellungen unter Umständen nicht möglich sein.

Schotter

Verbesserung der Kontrolle

Wenn Sie ein Auto für eine Fahrt auf Schotter optimieren möchten, kommt es vor allem auf eine flexible Kontrolle an. Der Zustand nicht befestigter Straßenoberflächen ist häufig unvorhersehbar und wenn Sie Ihre Ideallinie auch nur leicht verändern, können Sie in Bereiche mit einem völlig anderen Reibungskoeffizient kommen. Außerdem wirbeln Autos bei der Fahrt Sand, Staub und Schotter auf, wodurch die Straßenoberfläche für die nachfolgenden Fahrzeuge komplett verändert wird. Wird ein Auto einzig auf das Leistungslimit getunt wie auf einer asphaltierten Strecke, ermöglicht es nicht genug Flexibilität, um mit den plötzlichen Änderungen in der Straßenoberfläche fertig zu werden.

Eine Möglichkeit, das Auto für Straßenoberflächen dieser Art zu tunen, ist ein Setup, bei dem die Front leicht einlenkt, wenn der Fahrer den Fuß vom Gas nimmt, das aber beim Gasgeben über ein neutrales Steuern verfügt (d. h. weder Über- noch Untersteuern). Ein solches „übersteuerndes" Setup bietet zu einem gewissen Grad die Möglichkeit, das Einlenken über die Beschleunigung zu kontrollieren. Es kann erreicht werden, indem man ein 2-Wege-Sperrdifferenzial verwendet und die Bremsbalance zwischen Vorder- und Hinterachse anpasst.

Die Maßnahmen gegen Unter- und Übersteuern entsprechen auf Schotter den Maßnahmen auf befestigten Straßen. Der Bodenabstand hängt vollständig von der Straßenoberfläche ab. Es gilt immer noch: Je niedriger, desto besser. Aber Bodenwellen, Steine und andere Hindernisse erhöhen das Risiko, dass das Auto beschädigt wird. Auf Strecken mit Sprüngen sollte die Aerodynamik so abgestimmt werden, dass das Auto in der Luft eine gute Position beibehält. Der Motor sollte eher auf maximales Drehmoment als auf maximale Leistung getunt werden.

In der Regel gilt, dass man auf Schotter für eine hohe Geschwindigkeit dieselben Fahrtechniken wie auf der Rennstrecke benötigt.

Empfohlene Aufhängungseinstellungen

		FRONT	HECK
Bodenabstand		Hoch	Hoch
Stoßdämpfer	Ausfederung	Stark	Stark
	Einfederung	Stark	Stark
Federrate		Hart	Hart
Spureinstellung	Spur	Vorspur	0
	Radsturz	Negativ	Negativ
Querstabilisator		Weich	Hart

※Je nach Auto können einige dieser Einstellungen unter Umständen nicht möglich sein.

1,5-Wege 145
2-Wege 145

A

Abheben der Radinnenseite 162
Abtrieb 154, 165
Aerodynamik 165
Aerodynamisches Tuning 154
Anfangsdrehmoment 168
Anfangsdrehmoment-Tuning 145
Aquaplaning 170
Aufbohren 130
Aufladungskomponenten 136
Ausfederung [Dämpfungskraft] 159
Ausgleich 131
Auspuffsystem 129

B

Bodenabstand 158
Bremsbeläge 148
Bremsschwund vermeiden 148
Bremszangen 149
Brennkammer 134

D

Dichtungen platzieren 139
Domstrebe 146
Dämpfungskraft 159

E

Einfederung [Dämpfungskraft] 159

F

Federn 150
Federrate 158

G

Gewichtsreduzierung (Karosserie) 147
Gewichtsreduzierung (Motor) 131
Gewichtsverteilung 156
Große Bremsscheiben 149

H

Hochdruck-Turbine 136
Hochgeschwindigkeitsstrecken 166
Hohe Verdichtung 134
Hubraum vergrößern 130
Höhenverstellbare Aufhängung 150

K

Klopfen [unkontrollierte Verbrennung] 134
Kombinierte Schlitzanordnung 139
Kompressor 137
Kurze Übersetzung 141, 164

L

Ladedruck 136
Lange Getriebeübersetzung 140
Laufflächenprofil 153
Leichte Antriebswellen 143
Leichte Schwungräder 143
Luftfilter 129

M

Mechanisches Sperrdifferenzial 144
Motorsteuerung 128
Motoröl 129

N

Nachspur 161
Nasse Bedingungen 170
Negativer Sturz 160
Niederquerschnitt 153
Nockenwelle 133
Nockenwelle mit großem Hub 133

P

Punktschweißen 146

Q

Querstabilisatoren 151
Quetschzone 135

S

Scheibe und Abdeckung 142
Schotter 171
Seitenspoiler 155
Semi-Rennreifen 153
Slicks 152
Spur 161
Stabilisatorhärte 162
Stoßdämpfer 150

T

Technische Rennstrecken 167
Turbine vergrößern 137

U

Überholung 130
Übersetzungsverhältnis 164
Übersteuern entgegenwirken 169
Untersteuern entgegenwirken 168

V

Ventil 133
Verdichtung steigern 134
Verdichtungsverhältnis erhöhen 135
Verstärkung 131
Verwindungssteifigkeit 146
Vorspur 161

Z

Zusammensetzung 153
Zwischenkühler 137
Zylinderkopf 135
Zündkerzen 128

Weiter auf S. 194➡

Streckenreferenzen

4

The Gran Turismo Magazine
Beyond the Apex

Ascari Gesamtstrecke | Spanien

N

4 Daytona-Steilkurve 17°, Daytona

3 Eau Rouge, Spa-Francorchamps

1 Startgerade

2 Copse-Kurve, Silverstone

Es wurde besonders darauf geachtet, die natürliche Landschaft zu erhalten, selbst auf der Strecke. Die Randsteine weisen eine natürliche Farbe auf und sind nicht im üblichen Rot und Weiß gehalten.

Gesamtlänge: 5425 m	Höhenunterschied: 38,56 m	Längste Gerade: 470 m	Anzahl der Kurven: 26

40
0
-40

Ascari Gesamtstrecke

Spaniens längste Rennstrecke mit einer Vielzahl anspruchsvoller Kurven.

Die Strecke wurde nach dem legendären ehemaligen F1-Champion Alberto Ascari benannt. Sie ist der Mittelpunkt des Ascari Race Resort, einer groß anlegten Anlage für Autofans, die zehn Minuten vom Stadtzentrum von Ronda entfernt liegt, einer historischen Stadt in Südspanien, die durch ihre Stierkampfarena berühmt wurde. Die 26 Kurven der Strecke unterteilen sich in dreizehn Rechtskurven und dreizehn Linkskurven. Der Streckenverlauf ist also sehr ausgeglichen und technisch recht anspruchsvoll. Die Kurven auf der Strecke ähneln vom Verlauf her Kurven wie „Eau Rouge“ in Spa und „Copse“ in Silverstone.

Info Ein Motorsport-Resort für alle Autoliebhaber.

Wie der Name „Race Resort“ schon vermuten lässt, unterscheidet sich das Konzept dieser Anlage von dem anderer Rennstrecken. Um die Landschaft nicht zu verunstalten, gibt es keine hohen Gebäude wie zum Beispiel einen Kontrollturm. Derzeit finden hier keine Meisterschaftsrennen statt und nur Clubmitglieder dürfen das Gelände betreten. Diese Art Exklusivität wird von vielen Autoherstellern für Tests und Medien-Events genutzt.

Wie es sich für ein südeuropäisches Resort gehört, sind die Außenwände der Gebäude innerhalb der Anlage alle in Weiß gehalten. Neben dem Restaurant gibt es einen Pool, von dem aus man die gesamte Strecke im Blick hat. Hier kommt man in den Genuss eines Motorsporterlebnisses, das keine andere Rennstrecke bieten kann.

ANREISE

Spanien
Portugal
Córdoba
Sevilla
Málaga
Tangier

Fahren Sie vom Flughafen Sevilla durch Sevilla und in südlicher Richtung auf die A-376, dann auf die A-375, gefolgt von der A-384 und anschließend auf die A-367, bis Sie Ronda erreichen. Die Strecke ist zehn Minuten von Ronda entfernt und kann in einer geschätzten Gesamtfahrzeit von 1,5 Stunden erreicht werden. Man kann die Strecke auch vom Flughafen Gibraltar aus erreichen.

Liste mit Erklärungen

1	Startgerade	Die Gerade, durch die die Ideallinie bestimmt wird. Diese Gerade endet mit einer Schikane.
2	Copse-Kurve, Silverstone	Diese Sektion wurde nach der berühmten Kurve aus Silverstone benannt. Auch wenn sie kein exaktes Duplikat ist, weist diese Kurve doch die Hochgeschwindigkeitseigenschaften ihres Vorbilds auf.
3	Eau Rouge, Spa-Francorchamps	Eine rhythmische Folge von Kurven mit Anstiegen und Gefällen. Vom Aufbau her ist diese Kurvenfolge dem Streckenabschnitt „Eau Rouge“ in Spa-Francorchamps sehr ähnlich.
4	Daytona-Steilkurve 17°, Daytona	Dieser Hochgeschwindigkeitsabschnitt wurde von der langgezogenen Steilkurve in Daytona inspiriert, die sich durch ihre unglaubliche Neigung von 17 Grad auszeichnet.

Brands Hatch | Vereinigtes Königreich

7 Brabham-Gerade

1 „Paddock Hill“-Kurve

2 Druids-Kurve

3 Hawthorn Hill

4 Dingle Dell

5 Stirling-Kurve

6 Clark-Kurve

Indy-Strecke

GP-Strecke

Gesamtlänge: 3916 m	Höhenunterschied: 35 m	Längste Gerade: 475 m	Anzahl der Kurven: 9

*Die Zahlen beziehen sich auf die längste Streckenvariante der GP-Strecke.

30

0

-30

Brands Hatch

Eine technisch anspruchsvolle Strecke mit einer langen Geschichte und vielen Hügeln.

Brands Hatch liegt in Kent, ungefähr 30 km südöstlich von London, inmitten der satten grünen englischen Landschaft. In Brands Hatch finden schon seit 1950 Motorsportveranstaltungen statt. Die Strecke zeichnet sich durch anspruchsvolle Hochgeschwindigkeitsabschnitte, knifflige Mittel- bis Hochgeschwindigkeitskurven, zahlreiche Anstiege und Gefälle sowie eine schmale Streckenbreite aus. Es gibt zwei Varianten: Die GP-Strecke verläuft mitten durch den Wald und für die Indy-Strecke wird die Strecke von der „Surtees“ genannten Kurve 4 hin zur letzten Kurve, die den Namen „Clark-Kurve“ trägt, abgekürzt.

Info Für britische Rennsportfans liegt hier das „Herz“ des britischen Motorsports.

Jeder Abschnitt der Strecke würdigt einen der legendären britischen Rennfahrer. Diese Ehrerbietung ist durchaus angemessen, da diese Strecke eine wichtige Rolle in der Geschichte des britischen Motorsports gespielt hat. Viele berühmte Zweikämpfe wurden auf dieser Strecke ausgetragen und viele Rennfahrer nennen sie noch immer ihre Heimstrecke.

In einer Rennwoche finden an der „Paddock Hill“-Kurve zahlreiche Veranstaltungen für Gäste statt. Wenn gerade kein Rennen stattfindet, wird die Strecke normalerweise ausgiebig von jungen und auch älteren Rennfahrern aus der Gegend genutzt. Es ist der perfekte Beweis dafür, dass der Motorsportspaß keine Altersgrenzen kennt und sich allgemeiner Beliebtheit erfreut.

ANREISE

England

Bristol

London

Frankreich

Die Fahrtzeit von der Victoria Station in London bis zur Swanley Station beträgt ungefähr eine Stunde. Die Rennstrecke ist 8 km vom Stadtzentrum in Swanley entfernt und kann problemlos mit dem Bus oder dem Taxi erreicht werden.

Liste mit Erklärungen

1	„Paddock Hill“-Kurve	Die Brabham-Gerade steigt zunächst an und fällt anschließend bei der Einfahrt in diese erste Kurve ab, bei der man Können und Mut an den Tag legen muss.
2	Druids-Kurve	Diese Haarnadelkurve folgt, nachdem man den Hügel herabgefahren ist und anschließend den Anstieg nach der ersten Kurve genommen hat. Es handelt sich um eine nicht einsehbare Kurve, in der es häufig zu Unfällen kommt.
3	Hawthorn Hill	Diese Gerade mit Gefälle verläuft durch den Wald und bietet die beste Gelegenheit für Überholmanöver auf der Strecke.
4	Dingle Dell	Dies ist eine sehr schnelle Hochgeschwindigkeitskurve. Diesen Abschnitt zu meistern, ist eine echte Herausforderung, da die Ausfahrt nicht einsehbar ist und man den Scheitelpunkt nur sehr schwer trifft.
5	Stirling-Kurve	Dieser Abschnitt wurde nach dem legendären Fahrer Stirling Moss benannt. Nachdem man ihn durchfahren hat, sieht man die Ausfahrt aus dem Wald.
6	Clark-Kurve	Diese letzte Kurve weist eine Rechtsbiegung auf. Wegen des Höhenunterschiedes zwischen Einfahrt und Ausfahrt ist die Wahl des richtigen Gangs der Schlüssel zum Erfolg.
7	Brabham-Gerade	Die Startgerade. Einzigartig, weil sie zur Box hin geneigt ist.

Circuit de Spa-Francorchamps | Belgien

N

1 La Source

2 Eau Rouge

3 Kemmel-Gerade

4 Les Combes

5 Pouhon

6 Blanchimont

7 „Bus Stop"-Schikane

Gesamtlänge: 7004 m	Höhenunterschied: 104 m	Längste Gerade: 751,8 m	Anzahl der Kurven: 21

60
0
-60

Circuit de Spa-Francorchamps

Eine technisch anspruchsvolle Hochgeschwindigkeitsstrecke von Weltrang mit dynamischen Höhenunterschieden.

Spa-Francorchamps ist eine technisch anspruchsvolle Hochgeschwindigkeitsstrecke von Weltrang und liegt in den belgischen Ardennen in der Nähe der deutschen Grenze. Die Strecke ist berühmt für ihre langen Vollgasgeraden und Mittel- bis Hochgeschwindigkeitskurven, die durch das hügelige Gelände mit Höhenunterschieden von bis zu 104 Metern verlaufen. Der berühmte Eau Rouge ist ein steiler Hügel, der Spa ausmacht. Der extreme Höhenunterschied sorgt für wechselhafte Wetterbedingungen, worauf sich auch der Ausdruck „Spa-Wetter" zurückführen lässt. Um in Spa zu gewinnen, braucht man normalerweise Glück und Können.

Info Genießen Sie die schöne Natur, wenn Sie die Strecke besuchen.

Einer der Vorzüge von Spa-Francorchamps ist die Umgebung, die sich durch eine malerische Berglandschaft auszeichnet. Wie es der Name schon vermuten lässt, gibt es in den Städten in der näheren Umgebung viele natürliche Spas (Heilbäder), weshalb es ein beliebtes Erholungsgebiet für europäische Touristen ist. Nur fünfzehn Minuten Fahrtzeit von der Strecke entfernt kommt man in den Genuss einer wunderbaren Aussicht auf das Hohe Venn, das sich stark vom Wald der Ardennen unterscheidet.

Die Moorlandschaften des Hohen Venns (französisch: Hautes Fegnes) wurden durch eiszeitliche Gletscher geschaffen. Bei dem Gebiet handelt es sich um einen Naturpark, in dem der höchste Punkt Belgiens liegt. Abhängig vom Wetter kann man von hier aus bis nach Deutschland oder in die Niederlande sehen.

ANREISE

Amsterdam
Niederlande
London
Köln
Brüssel
Belgien
Deutschland
Frankreich

Spa liegt ungefähr eineinhalb Zugstunden vom Brüsseler Hauptbahnhof entfernt. Vom Hauptbahnhof in Verviers sind es ebenso viele Busstunden. Es ist empfehlenswert, mit dem Auto eine Spritztour durch die belgische Landschaft zu machen, und da die Strecke in der Nähe der deutschen Grenze liegt, ist auch eine Anfahrt aus Frankfurt möglich.

Liste mit Erklärungen

Nr.	Abschnitt	Erklärung
1	La Source	Diese scharfe Haarnadelkurve muss als erste Hürde genommen werden. Bei so einer plötzlichen Bremszone direkt nach dem Start kann es zu Positionsveränderungen kommen.
2	Eau Rouge	Die berühmten Links-Rechts-Links-Hochgeschwindigkeitskurven von Spa, die für starke g-Kräfte sorgen und in einen starken Anstieg übergehen.
3	Kemmel-Gerade	Die längste Gerade auf der Strecke. Die hier erreichte Höchstgeschwindigkeit hängt davon ab, wie gut man Eau Rouge gemeistert hat.
4	Les Combes	Hier liegt der höchste Punkt der Strecke. Nachdem man diesen Punkt durchfahren hat, folgen Mittel- bis Hochgeschwindigkeitssektionen mit Gefälle.
5	Pouhon	Eine Hochgeschwindigkeitskurve gefolgt von einem Abschnitt mit Gefälle. Hier ist es wichtig, die Scheitelpunkte richtig zu bestimmen, da es sich hier um eine Kombination aus langgezogenen Kurven handelt.
6	Blanchimont	Diese Hochgeschwindigkeitssektion beginnt an der Ausfahrt aus den Paul-Frère-Kurven, die wie Eau Rouge den Mut des Fahrers auf die Probe stellen.
7	„Bus Stop"-Schikane	Bei dieser Schikane muss das Auto abgebremst werden, sogar noch mehr als bei La Source. Hier finden häufig Bremsduelle statt, weshalb dieser Abschnitt besonders für Überholmanöver bekannt ist.

Goodwood Hillclimb | Vereinigtes Königreich

Einen Auslaufbereich nach dem Tor ... gibt es nicht. Man braucht Können und Mut, um durch diesen Abschnitt zu kommen.

2 Molecomb-Kurve

3 Flint Wall

1 Park-Gerade

Gesamtlänge: 1867 m	Höhenunterschied: 92,7 m	Längste Gerade: 360 m	Anzahl der Kurven: 9

150
75
0

Goodwood Hillclimb

Das berühmteste Zeitrennen der Welt.

Jeden Juli findet in England ein großes Motorsport-Festival namens „Goodwood Festival of Speed“ statt. Die Hauptveranstaltung besteht aus dem berühmten Hillclimb, der auf dem Grundstück des Earl of March ausgetragen wird. Die 1,16 Meilen (ungefähr 1,9 km) lange Strecke wird von altmodischen Strohbarrieren gesäumt und verläuft durch den Garten des Grundstücks und hinaus auf ein weitläufiges Weideland. Trotz des einfachen Streckenverlaufs ist der Schwierigkeitsgrad sehr hoch, da die Strecke extrem eng ist. Der Streckenrekord von 41,6 Sekunden wurde im Jahr 1999 von Nick Heidfeld in einem McLaren MP4-13 aufgestellt.

Info Ein Motorsport-Festival für alle Altersgruppen.

Viele denken, dass dieses Festival nur für Spezialisten gedacht ist, aber in Wahrheit kann jeder das Goodwood Festival of Speed besuchen, sofern er ein Ticket erwirbt. Viele bringen ihre Familien, einen Picknickkorb und Klappstühle mit, um den Tag zu genießen. Und da viele der Rennfahrer ganz zwanglos auf dem Gelände herumspazieren, kann man durchaus auch auf seinen Lieblingsfahrer treffen.

Die Autohersteller präsentieren hier oft ihre neuesten und historischsten Autos, aber manchmal könnten Sie auch Kuriositäten wie diese zu sehen bekommen. Es sieht aus wie ein Bett, doch es ist tatsächlich ein registriertes und für den öffentlichen Straßenverkehr zugelassenes Auto.

ANREISE

Die Fahrt von der Victoria Station in London zum Bahnhof von Chichester dauert 90 Minuten und man muss ein Mal umsteigen. Wenn Veranstaltungen stattfinden, fahren Shuttle-Busse vom Bahnhof bis zum Goodwood-Gelände. Von der Shuttle-Haltestelle sind es zu Fuß nur ein paar Minuten bis zur Strecke.

Liste mit Erklärungen

Nr.	Name	Erklärung
1	Park-Gerade	Goodwood House kann man von der Startlinie aus sehen, unterhalb der Bäume bei der unter freiem Himmel liegenden Geraden.
2	Molecomb-Kurve	Diese Linkskurve nach der Geraden steigt stetig an, aber die Straße ist eng und es gibt buchstäblich keinen Auslaufbereich. Eine Mutprobe für die Fahrer.
3	Flint Wall	Dieser Abschnitt ist mit seinen Links- und Rechtskurven wie eine Schikane aufgebaut. Die entsprechend platzierte Backsteinmauer sorgt außerdem dafür, dass die Kurve nicht einsehbar ist.

Matterhorn | Schweiz

Rotenboden Kurve 7

Gesamtlänge: 3577,8 m	Höhenunterschied: 236 m	Längste Gerade: 415 m	Anzahl der Kurven: 15

*Die Zahlen beziehen sich auf die längste Variante von Matterhorn Rotenboden.

Matterhorn

Eine anspruchsvolle Strecke im 4000 m hohen Gebirgszug.

Die majestätischen Schweizer Alpen und der beeindruckende 4478 m hohe Gipfel des Matterhorns dienen als Hintergrund für diese einzigartige Strecke in der Nähe der berühmten Bahnstation Gornergrat. Die Strecke besteht aus einer langen Vollgassektion und Hochgeschwindigkeitskurven, was sie technisch sehr anspruchsvoll macht. Die Übergänge von der Hochgeschwindigkeitssektion zu den mittelschnellen und langsamen Kurven sind bemerkenswert. Die Strecke selbst ist breit, aber da es sich um eine Gebirgsstrecke handelt, gibt es zahlreiche nicht einsehbare Kurven und starke Gefälle. Mit einer normalen Straßenstrecke ist sie aufgrund der vielen einzigartigen Herausforderungen daher gar nicht zu vergleichen.

Info Ein majestätischer Blick auf die Welt jenseits der Baumgrenze.

Die Strecke liegt im Gebiet Riffelberg und Rotenboden, das über 2500 m über dem Meeresspiegel liegt. Sie ist auch ein zentraler Anlaufpunkt für Reisende, die sich an der großartigen Landschaft der Alpen erfreuen wollen. Das Skifahren gehört in den Alpen einfach dazu. Wenn Sie aber lieber die Pflanzenwelt des Hochgebirges (etwa das Edelweiß) genießen möchten, wilde Tiere und die majestätische Aussicht von den hohen Bergen entdecken wollen, ist es empfehlenswert, während der Wandersaison im Frühling und Sommer hierher zu reisen.

Die Gornergratbahn braucht von ihrem Startpunkt in Zermatt bis zum Gornergrat ungefähr 30 Minuten und bewältigt dabei 1400 Höhenmeter. Vor der Ankunft auf dem Riffelberg wird man mit einer majestätischen Aussicht aus dem Wald heraus belohnt.

ANREISE

Vom Flughafen Genf oder vom Flughafen Zürich benötigt man in etwa vier Stunden bis zum Bahnhof in Zermatt, dem Startpunkt der Gornergratbahn. Von dort dauert es in etwa zwanzig Minuten bis zum Riffelberg. Bitte beachten Sie, dass in Zermatt keine Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren erlaubt sind.

Liste mit Erklärungen

1	Rotenboden Kurve 7	Dieser Abschnitt mit Gefälle führt um die Station Rotenboden herum. Es gibt viele enge Kurven und eine langgezogene Hochgeschwindigkeitskurve, die höchste Konzentration erfordert.
2	Riffelsee Kurve 2	Dieser Abschnitt mit Gefälle endet führt in einen achterbahnartigen Anstieg in Richtung Riffelberg.
3	Dristelen Kurve 1	Diese Hochgeschwindigkeitskurve verläuft in Richtung Matterhorn. Hier ist es besonders wichtig, die Querneigung zu nutzen. Man sollte sich dabei nicht von der schönen Landschaft ablenken lassen.

Mount Panorama Motor Racing Circuit | Australien

N

1 Hell Corner

2 Berggerade

3 Brock's Skyline

4 The Dipper

5 Forrest's Elbow

6 Conrod-Gerade

7 The Chase

Gesamtlänge: 6213 m	Höhenunterschied: 174 m	Längste Gerade: 1916 m	Anzahl der Kurven: 23

Mount Panorama Motor Racing Circuit

Eine berühmte Rennstrecke in Australien, die öffentliche Straßen nutzt.

Die Strecke Mount Panorama Motor Racing Circuit liegt in Bathurst in New South Wales, Australien, und ist für das „Bathurst 1000“ und andere beliebte Veranstaltungen bekannt. Das Besondere an dieser Strecke mitten in den Bergen ist, dass sie öffentliche Straßen nutzt. Auch wenn es viele lange Vollgassektionen am Anfang und am Ende der Strecke gibt, weisen die anderen Abschnitte extreme Anstiege und Gefälle und viele nicht einsehbare Kurven auf. Die schwierigen Eigenschaften dieser Strecke machen ihren Reiz aus.

Info Genießen Sie die wunderbare Kulisse von Bathurst.

Wie es der Streckenname schon sagt, macht der Ausblick von der Gebirgslandschaft einen Teil ihres Charmes aus. Die Strecke wird normalerweise als öffentliche Straße und ist bei jungen und älteren einheimischen Spaziergängern und Joggern beliebt. Wenn Sie jemals hier entlangfahren, sollten Sie allerdings auf Ihre Geschwindigkeit achten, da die erlaubte Höchstgeschwindigkeit bei 60 km/h liegt und die Polizei streng gegen Temposünder vorgeht.

Die Gegend um Brock‘s Skyline herum ist sehr beliebt, weil man hier die tolle Aussicht auf die Stadt Bathurst genießen kann. Viele Einwohner schauen im Laufe des Tages hier vorbei, aber besonders bemerkenswert ist der nächtliche Ausblick. Gerne kommt man mit dem Auto hierher, um sich zu treffen und das abendliche Panorama zu genießen.

ANREISE

Fahren Sie ungefähr drei Stunden auf dem Barrier Highway (Route A-32), um das 200 km westlich von Sydney liegende Bathurst zu erreichen. Wenn Sie fliegen wollen, nutzen Sie die regelmäßig von Regional Express angebotene Flugverbindung in Sydney, um Ihr Ziel in circa 50 Minuten zu erreichen.

Liste mit Erklärungen

1	Hell Corner	Diese Linkskurve folgt unmittelbar nach dem Start. Die scharfe Kurve ist typisch für eine öffentliche Straße.
2	Berggerade	Diese lange Vollgassektion befindet sich im ersten Teil der Strecke. Wie der Name schon sagt, handelt es sich um eine Gerade, die zur Seite des Berges führt.
3	Brock's Skyline	Ein Abschnitt, der nach dem legendären Fahrer Peter Brock benannt wurde. Die weitreichende Aussicht auf der rechten Seite ist schon ein Highlight für sich.
4	The Dipper	Der schwierigste Abschnitt der Strecke. Die sich wiederholenden nicht einsehbaren Kurven und die schmale Strecke erinnern an den Nürburgring.
5	Forrest's Elbow	Am Ende des hügeligen Abschnitts der Strecke folgt eine Kurve, die nach dem Motorradrennfahrer Jack Forrest benannt wurde, der hier einen Unfall hatte.
6	Conrod-Gerade	Diese lange Gerade beginnt, nachdem man einen steilen Hügel herabgefahren ist. Die Höchstgeschwindigkeit liegt hier gerne mal bei über 300 km/h.
7	The Chase	Diese für die Tourenwagen-Weltmeisterschaft 1987 gebaute Schikane bremst die Autos stark ab, bevor die Rennfahrer auf die letzte Kurve zufahren.

Silverstone Circuit | Vereinigtes Königreich

Gesamtlänge: 5891 m	Höhenunterschied: 11,34 m	Längste Gerade: 789 m	Anzahl der Kurven: 18

*Die Zahlen beziehen sich auf die längste Streckenvariante der GP-Strecke.

Silverstone Circuit

Eine traditionelle Rennstrecke mit über 65 Jahren Geschichte.

Der Silverstone Circuit wurde 1948 auf einem Flugfeld der Royal Air Force eröffnet. Im Jahr 1950 wurde hier der erste Formel-1-Grand-Prix, der Große Preis von Großbritannien, ausgetragen. Seitdem wurde die Rennstrecke in den Geschichtsbüchern als Geburtsort des Motorsports vermerkt. Jüngere Verbesserungen haben die Strecke technisch anspruchsvoller werden lassen und ihren Ruf und die Eigenschaften als Hochgeschwindigkeitsstrecke trotzdem erhalten. Drei unterschiedliche Streckenlayouts werden verwendet: der National Circuit, für den der nördliche Abschnitt genutzt wird, der International Circuit, für den der südliche Abschnitt genutzt wird und schließlich der Grand Prix Circuit, der beide Teilstrecken kombiniert.

Info Silverstone, das Original: Wo das Virtuelle zur Realität wird.

Seit dem Start des „GT Academy"-Programms diente Silverstone als Ort für die letzte Auswahlrunde, in der dem besten „Gran Turismo"-Spieler die Möglichkeit gegeben wird, ein professioneller Rennfahrer zu werden. Seit dem ersten Wettbewerb im Jahr 2008 sind sechs Jahre vergangen und in dieser Zeit ist Silverstone zu einer regelrechten Pilgerstätte für Rennfahrer und Fans von Gran Turismo geworden.

Hier ist eine Szene aus dem Finale der GT Academy in Silverstone zu sehen. Neben den Fahrtechniken wird auch das Potential der Rennfahrer überprüft. Dazu zählen Tests der physischen Fitness, der Führungsqualitäten, der Kommunikationsfähigkeiten und natürlich des fahrerischen Könnens.

ANREISE

Manchester

England

Bristol

London

Die Fahrt mit dem Zug von der Euston Station zur Northampton Station dauert ungefähr eine Stunde. Von dort sind es noch etwa 30 Minuten mit dem Taxi. Bitte beachten Sie, dass während einer Rennwoche um Silverstone herum reger Verkehr herrscht. Sie sollten daher auf jeden Fall ausreichend Zeit für die Anreise einplanen.

Liste mit Erklärungen

1	„International Pits"-Gerade	Nach jüngsten Verbesserungen wurde das die neue Startgerade. Das neueste Fahrerlager, „The Silverstone Wing", ist in Sichtweite.
2	Wellington-Gerade	Diese neue Gerade ging auch aus den jüngsten Verbesserungen hervor. Am Ende folgt eine scharfe Kurve, die ideal für Überholmanöver geeignet ist.
3	Copse-Kurve	Durch die Änderung der Ideallinie ist die Geschwindigkeit bei der Einfahrt in diese Super-Hochgeschwindigkeitskurve jetzt sogar noch größer. Für die Fahrer ist es nicht leicht, die Kurve mit Vollgas zu durchfahren.
4	Maggotts--Becketts--Chapel-Kurve	Man sagt, dass die aufeinanderfolgenden S-Kurven in Silverstone der Schlüssel zum Sieg sind. Der Schwierigkeitsgrad hier gehört wohl zu den höchsten weltweit.
5	Hanger-Gerade	Die längste Gerade in Silverstone erstreckt sich über eine Länge von ungefähr 800 m. Die Strecke ist zudem recht breit, was aggressive Überholmanöver ermöglicht.
6	Stowe	Ähnlich wie bei der Copse-Kurve folgt nach der Kurve eine lange Gerade, aber es muss dennoch abgebremst werden. Das Durchfahren des Scheitelpunktes erfordert Geduld, weshalb diese Kurve schwer zu meistern ist.
7	Club	Diese nicht einsehbare Kurve weist eine leicht rückwärtige Neigung auf. Seit dem Ende der Streckenerneuerung ist das die letzte Kurve.

Twin Ring Motegi – Straßenkurs | Japan

1 Hauptgerade

2 Vierte Kurve

3 First Under Bridge

4 S-Kurve

5 Haarnadelkurve

6 Abwärtsgerade

7 Victory-Kurve

Westl. Kurzstrecke
Östl. Kurzstrecke
Straßenkurs

Gesamtlänge: 4801 m	Höhenunterschied: 30,4 m	Längste Gerade: 762 m	Anzahl der Kurven: 14

*Die Zahlen beziehen sich auf die längste Variante des Straßenkurses.

30
0
-30

Twin Ring Motegi – Straßenkurs

Die zweite internationale Straßenrennstrecke von Honda.

Der Twin Ring Motegi – Straßenkurs ist eine internationale Standard-Rennstrecke, die im Jahr 1997 von Honda gebaut wurde. Der im europäischen Stil gehaltene Straßenkurs weist einen Stop-and-Go-Geschwindigkeitsverlauf auf und hat einen ganz anderen Streckencharakter als der Hondas Suzuka Circuit. Durch die Verwendung von Abkürzungen sind drei Streckenverläufe möglich: die östliche Kurzstrecke, die westliche Kurzstrecke und der Straßenkurs als längste Variante. Den Höhepunkt der Strecke bildet die Abwärtsgerade, die von einem starken Gefälle aus auf die 90-Grad-Kurve zuläuft. Die hier durchgeführten Bremsmanöver sind äußerst heftig.

Info Eine Nachricht des Motorsports an alle, die vom großen Erdbeben in Nordost-Japan betroffen sind.

Das große Erdbeben im Nordosten Japans ist allen noch gut in Erinnerung. Von allen großen internationalen Rennstrecken Japans liegt diese dem Katastrophengebiet am nächsten und wurde am schwersten durch das Beben beschädigt. Dennoch wurde die Strecke noch im selben Jahr wieder instand gesetzt. Unter dem Motto „Auf geht‘s, Japan!“ meldete sich Motegi wieder im Motorsport zurück. Seitdem finden hier regelmäßig Veranstaltungen für den Wiederaufbau statt, wodurch die Strecke zum Symbol für den japanischen Willen wurde, die Auswirkungen der Katastrophe zu bewältigen.

Auf einem Banner an der Ziellinie des Straßenkurses steht がんばろう!日本, was so viel wie „Auf geht‘s, Japan!“ bedeutet und sich auf das große Erdbeben im Nordosten Japans bezieht. Da sich die Strecke ganz in der Nähe des Katastrophengebietes befindet, spendeten diese Worte allen Motorsportfans im Land Mut und Hoffnung.

Von Tokio aus erreicht man Motegi am günstigsten, indem man den Hochgeschwindigkeitszug nach Utsunomiya nimmt. Die Fahrt dauert ungefähr 50 Minuten. Von dort aus sind es weitere 90 Minuten mit dem Bus. Mit einem Taxi erreicht man das Ziel etwas schneller, allerdings ist das erheblich teurer. Bei Rennveranstaltungen herrscht zudem ein ziemlich reger Verkehr, weshalb man genügend Zeit für die Anreise einplanen sollte.

Liste mit Erklärungen

1	Hauptgerade	Die Startgerade ist das herausragende Merkmal der Strecke. An ihrem Ende befindet sich ein schwieriger Abschnitt, der aus zwei aufeinanderfolgenden Kurven besteht.
2	Vierte Kurve	Die Kurvenkombination besteht hier aus den Kurven 3 und 4. Aber der Radius ist viel kleiner.
3	First Under Bridge	In der Nähe der engen fünften Kurve des Straßenkurses treffen die beiden Motegi-Strecken aufeinander. Der Super Speedway befindet sich direkt über der Einfahrt in die Kurve.
4	S-Kurve	Diese S-Kurve weist einen starken Links-Rechts-Übergang auf. Anstatt also mit Höchstgeschwindigkeit in sie einzufahren, sollte man den kürzesten Weg durch den Abschnitt finden.
5	Haarnadelkurve	Da sich diese Kurve am obersten Punkt des Anstiegs befindet, ist das Bremsen nicht sehr schwer. Der Scheitelpunkt sollte vorsichtig geschnitten werden, damit man auf der folgenden Geraden schnell ist.
6	Abwärtsgerade	Die längste Gerade der Strecke geht in eine Rechtskurve über und fällt dabei ab. Sie ist ideal für Überholmanöver geeignet.
7	Victory-Kurve	Diese letzte Kurve ist wie eine Schikane aufgebaut und besteht aus zwei aufeinanderfolgenden Linkskurven und einer Rechtskurve.

Willow Springs International Raceway - Big Willow | USA

5 Sweeper

6 Kurve 9

4 Monroe Ridge

Im Bereich des Fahrerlagers auf der linken Seite der Startgeraden befinden sich das Restaurant und die Garage eines Privatrennfahrers.

1 Castrol-Kurve

3 The Omega

2 The Rabbit's Ear

Gesamtlänge: 3951 m	Höhenunterschied: 50 m	Längste Gerade: 756 m	Anzahl der Kurven: 10

50
0
-50

Willow Springs International Raceway -Big Willow

Eine Hochgeschwindigkeitsstrecke, die die Umgebung für extreme Wellenformen und Hochgeschwindigkeitskurven nutzt.

Die nostalgische Rennstrecke Willow Springs International Raceway liegt in der Wüste in der Nähe von Los Angeles und wurde im Jahr 1953 eröffnet. Man findet hier eine ganze Reihe von Strecken, aber die Hauptstrecke ist unter dem Namen Big Willow bekannt. Es handelt sich dabei um eine ungefähr 4 Kilometer lange Hochgeschwindigkeitsstrecke, die sich durch Mittel- und Hochgeschwindigkeitskurven auszeichnet. Auf den ersten Blick macht die Strecke einen einfachen Eindruck, aber die vielen langgezogenen Kurven erschweren das Beibehalten der richtigen Geschwindigkeit. Hinzu kommen starke Höhenunterschiede, die die Strecke zur vielleicht am meisten gefürchteten im ganzen Land machen. Das Auto bei Höchstgeschwindigkeit unter Kontrolle zu halten, ist entscheidend, um diese Strecke zu meistern.

Info Der heilige Boden des US-Rennsports.

Willow Springs wird von einem Familienunternehmen geführt und ist von einer idyllischen und ruhigen Atmosphäre geprägt. Das Personal umfasst nur wenige Mitarbeiter, aber alle sind freundlich und hilfsbereit. Es gibt zahlreiche Privatrennfahrer, die Garagen auf dem Gelände besitzen und häufig ins Gespräch mit den Besuchern kommen. Eigene private Autoprojekte sind ein häufiges Gesprächsthema.

Das klimatisierte Fahrerlager und Restaurant ist ein echter Geheimtipp und ein toller Ort, um der brütenden Hitze zu entfliehen. Die Speisekarte bietet typisch amerikanische Kost: herzhafte, leckere Mahlzeiten zu einem fairen Preis.

ANREISE

San Francisco

Las Vegas

Vereinigte Staaten von Amerika

Los Angeles

Mexiko

Für die Anreise benutzt man am besten das Auto. Vom Los Angeles International Airport fährt man auf der I-405 nach Norden, anschließend auf die I-5 und nimmt dann die State Route, um Rosamond nach ungefähr 90 Minuten zu erreichen. Nach weiteren 5 km erreicht man schließlich die Rennstrecke.

Liste mit Erklärungen

Nr.	Name	Erklärung
1	Castrol-Kurve	Die Linkskurve nach der Startgeraden ist ein technisch anspruchsvoller Abschnitt der Rennstrecke.
2	The Rabbit‘s Ear	Wie es der Name schon sagt, ähnelt dieser Abschnitt von der Form her einem Hasenohr. Wegen der langgezogenen Kurve ist es extrem wichtig, den Scheitelpunkt richtig zu bestimmen.
3	The Omega	Dieser Teil stellt den Mittelpunkt der technisch anspruchsvollen Sektion dar und ist zudem das herausragende Merkmal der Strecke. Der Blick auf die Landschaft, der sich einem von der Abwärtskurve aus bietet, ist spektakulär.
4	Monroe Ridge	Die Sicht wird zum Teil durch den wellenförmigen Streckenverlauf behindert, aber wenn man diese wichtige Kurve auf der Ideallinie durchfährt, erreicht man in der Hochgeschwindigkeitssektion ein gutes Tempo.
5	Sweeper	Eine extrem schnelle Kurve, die für das Beherrschen der Strecke entscheidend ist. Wer hier schnell durchfährt, könnte bei der örtlichen Bevölkerung zur Legende werden.
6	Kurve 9	Die letzte Kurve. Auf den ersten Blick mag sie leicht erscheinen, aber durch die enge Ausfahrt aus der Kurve, ist es schwierig, die Ideallinie zu halten.

Willow Springs International Raceway- Streets of Willow | USA

N

1 | Kurve 2

2 | Kurve 4

3 | The Bowl

4 | Kurve 11

5 | Kurve 14

Gesamtlänge: 2675 m	Höhenunterschied: 20 m	Längste Gerade: 395 m	Anzahl der Kurven: 14

20
0
-20

Willow Springs International Raceway -Streets of Willow

Eine technisch anspruchsvolle Strecke Kurven aller Art.

Diese kurze Strecke ist nur ungefähr 2,6 km lang und befindet sich im nördlichen Teil von Big Willow. Sie wird häufig als Teststrecke genutzt und dient als Austragungsort für eine Reihe von „Renntag"-Veranstaltungen. Nur wenige richtige Rennen werden hier ausgetragen. Der Streckenverlauf ist technisch sehr anspruchsvoll. Abgesehen von zwei kurzen Geraden, auf denen man Gas geben kann, besteht die Strecke zu einem großen Teil aus langsamen bis mittelschnellen aufeinanderfolgenden Kurven. Die Strecke ist von der Gesamtlänge her recht kurz, aber dennoch ziemlich schwierig, vor allem aufgrund der vielen verschiedenen Kurven, die von einfachen langgezogenen Kurven bis hin zu schwierigen Kurvenkombinationen reichen. Durch die vielen verschiedenen Kurven ist die Strecke ein idealer Ort, um sein fahrerisches Können zu verbessern.

Info Ein Sandsturm in der Mohave-Wüste, wie man ihn aus vielen Hollywood-Filmen

Der starke Wind und die glühende Hitze der Wüste erinnern einen daran, wie unbarmherzig Mutter Natur sein kann, ganz gleich zu welcher Jahreszeit. Auf dieser Rennstrecke erhält man eine Kostprobe dieser rauen Elemente. In der Gegend kommt es ab und an zu Sandstürmen. Wenn man sieht, wie sich die großen Sandwolken aus der Ferne nähern, bekommt man es durchaus mit der Angst zu tun. Ein paar Mal im Jahr regnet es aber auch in der Mohave-Wüste und in Jahren, in denen besonders viel Regen fällt, erstrahlen die Hügel um die Strecke herum in einem leuchtenden Grün, wodurch die Landschaft wie ausgewechselt erscheint.

Der Willow Springs Raceway befindet sich inmitten der Mohave-Wüste, die als Drehort für den Film „Out of Rosenheim" genutzt wurde. Bei der Fahrt zur Rennstrecke erweckt die Aussicht vom Freeway das Gefühl, man befände sich in einer riesigen Filmkulisse.

ANREISE

San Francisco

Las Vegas

Vereinigte Staaten von Amerika

Los Angeles

Mexiko

Man erreicht die Strecke nahezu so wie die zuvor beschriebene Strecke „Big Willow". Alternativ kann man allerdings auch eine andere Route nehmen, indem man auf der I-5 nach Norden fährt, bis man an den Bergen vorbei ist, und anschließend fährt man über die Seitenstraßen entlang der State Route 138. So kommt man während der Anreise in den Genuss der weiten amerikanischen Landschaft.

Liste mit Erklärungen

1	Kurve 2	Die ersten paar Kurven weisen einen Höhenunterschied von mindestens 10 Metern auf. Der Streckenverlauf ist daher durch starke Anstiege und Gefälle geprägt. Nach der hier gezeigten Straße folgt eine schwierige abfallende Linkskurve.
2	Kurve 4	Dieser Teil der Strecke zeichnet sich durch eine scharfe, ansteigende Haarnadelkurve aus. Durch den rauen Straßenbelag ist es hier schwierig, das Auto stabil zu halten.
3	The Bowl	Diese berühmte langgezogene Kurve trägt den Namen „Bowl" und weist eine 20-Grad-Neigung auf.
4	Kurve 11	Bei dieser schnellen Linkskurve, die einer langen Gerade folgt, ist eine ruhige Bremskontrolle nach den aufeinanderfolgenden S-Kurven besonders wichtig.
5	Kurve 14	Diese Kurve zeichnet sich durch ihre Weitläufigkeit aus, wodurch sie wie eine riesige Schleuderplatte aussieht und wirkt. Bei Rennen werden hier Kegel aufgestellt, um sie zu einer „normalen" Kurve zu machen.

1-Weg 145

A

Aufbohren 130

B

Bremsflüssigkeit 148
Bremsschläuche 149
Brückeneinlass 139
Buchsen 151

C

Chassisversteifung 147

F

Feintuning 128
Frontspoiler 154

H

Heckdiffusor 155
Heckflügel 155
Heckstoßstangenspoiler 155

K

Kanäle polieren 133
Kurze Übersetzung 140

L

Lange Übersetzung 141

M

Mehrscheibenkupplungen 142

P

Positiver Sturzwinkel 160

S

Sperrdifferenzial 144
Sperrwert 145

U

Überrollkäfig 147
Übersetzung des Endantriebszahnrades 140
Umfangseinlass 139

V

Ventilfeder 133
Ventilvergrößerung 133

W

Wankelmotoren 138

Z

Zylinderkopfdichtung 135

ba

The Gran Turismo Magazine
Beyond the Apex

Beyond the Apex

Grafikdesign
Eichi Abe
Yuichi Miyashita

Technische Illustration
Tadao Abe

Bilder
HKS Co. Ltd.
GTA Co. Ltd.
Software Cradle Co. Ltd.
Toyota Motor Corporation
Nissan Motor Co. Ltd.
Fuji Heavy Industries Ltd.
Honda Motor Co. Ltd.
Mazda Motor Corporation
BMW AG
Daimler AG
International Sportsworld Communicators Ltd.

ba

The Gran Turismo Magazine

Beyond the Apex